circuitos eletrônicos

Programas para análise e projetos

Raul M. P. Friedmann

RAUL M. P. FRIEDMANN

circuitos eletrônicos MSX

1ª edição
1988

EXPEDIENTE:

Coordenação Editorial: Pierluigi Piazzi
Coordenação Didática: Betty Fromer Piazzi
Produção Editorial: Rosa Kogan Fromer
Editoração: Renato da Silva Oliveira
Arte e Capa: Ana Lúcia Antico
Ilustrações: Alfredo Lenz

ALEPH Publicações e
Assessoria Pedagógica Ltda.
Av. Dr. Guilherme D. Villares, 1523
05640 - São Paulo - SP
Caixa Postal - 20707 - CEP 01498
Fone: (011) 843-3202

Dados de Catalogação na Publicação (CIP) Internacional
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Friedmann, Raul Marques Pereira, 1963-
P946c Circuitos eletrônicos : programas para análise e projeto / Raul M.P. Friedman. -- São Paulo : Aleph, 1988.

Bibliografia.

1. Circuitos eletrônicos - Projeto I. Título.

88-0518 CDD-621.38153

Índices para catálogo sistemático:
1. Circuitos eletrônicos : Análise e projeto : Engenharia eletrônica 621.38153
2. Circuitos eletrônicos : Projeto : Engenharia eletrônica 621.38153

Sumário

Aos meus amigos

Dalton Abreu

Renato Serafim

Sérgio Furtado

Pelos bons e maus momentos
de nossas melhores aventuras.

Nota do Editor

Quando o MSX foi lançado no Japão, há alguns anos, a estratégia de marketing adotada pelos fabricantes foi a de penetrar nos lares com um computador doméstico disfarçado de vídeo-game de luxo.

Em primeiro lugar isto representou uma grande injustiça com relação à capacidade da máquina. Afinal das contas, um equipamento capaz de gerenciar um disco rígido de 40 MegaBytes(!) enquanto opera 4,22 MegaBytes de floppy-disk, é muito, mas muito mais que um simples vídeo game.

Em segundo lugar, um microcomputador de arquitetura tão versátil e tão facilmente configurável tem, no mínimo, vocação para aplicações sérias e profissionais. Do ponto de vista educacional, então, nem se fala: qualquer professor com uma habilidade média para programar em BASIC, consegue efeitos que em outros micros só são obtidos em Linguagem de Máquina após horas e horas de trabalho por parte de um programador muito experiente.

Quando este micro maravilhoso foi lançado no Brasil, os fabricantes, acostumados a copiar o hardware e o software graças às distorções que nossa estranha política de informática gerou, cometeram o grave erro de copiar também a estratégia de marketing dos fabricantes japoneses.

Aqui no Brasil, portanto, durante muito tempo, o MSX foi encarado como um brinquedinho inútil enquanto que as ditas "tarefas sérias" eram executadas em micros de muito menor capacidade e versatilidade ou então de custo muito mais elevado.

Alguns poucos, percebendo o enorme potencial desta máquina (e entre eles temos o orgulho de nos incluir), começaram a conscientizar o mercado das possibilidades incríveis que este micro oferece.

Foi um trabalho penoso que, paradoxalmente, contou com pouquíssimo apoio dos dois fabricantes de MSX no Brasil. Apesar disso, começou recentemente a render seus frutos e o MSX está hoje mostrando sua verdadeira vocação de microcomputador a nível Profissional Jr.

Foi com base nesta filosofia que resolvemos publicar este livro de ferramentas de cálculo e análise para projetos de eletrônica.

Trata-se de um trabalho altamente profissional, voltado para profissionais da área (técnicos e engenheiros eletrônicos) utilizando um micro profis-

sional !

Obviamente o público alvo que se interessa por uma obra desta natureza é muito mais reduzido que o universo dos usuários de MSX. Isto faz com que, do ponto de vista empresarial, esta obra represente um empreendimento pouco rentável e arriscado tanto para o editor quanto para o autor.

Entretanto resolvemos, de caso pensado, pagar o preço do pioneirismo e colocar no mercado um produto inovador que, se será útil para poucos, entretanto terá muita utilidade para cada um deles individualmente.

Todas as ferramentas apresentadas neste trabalho poderiam ter sido produzidas simplesmente em meio magnético (fita ou disco) que viria acompanhado de um material impresso muito mais simples e sintético que este livro. Razões comerciais, porém, nos obrigariam a proteger o software e a exiguidade de um simples manual de instruções eliminaria o carácter didático que sempre queremos imprimir a toda nossa produção.

Não faz parte de nosa filosofia editorial "esconder o leite", muito pelo contrário!

Por isso optamos pela edição deste livro. Esperamos, portanto, não só que ele seja útil aos leitores, mas também que sirva de incentivo a outros autores e editoras no sentido de produzir material profissional para este mercado tão carente de obras sérias e úteis.

Prefácio

O prefácio não é a parte mais interessante de um livro e muito menos a que os leitores tem mais vontade de ler. Para falar a verdade, o mesmo se aplica aos autores de livros quando escrevem os prefácios. Mas, já que você chegou até aqui, por favor, continue mais um pouco a fim de se conscientizar do propósito deste livro e tirar dele o máximo proveito.

Esta obra abrange vários assuntos de interesse na área de circuitos eletrônicos e alguns deles também de interesse nas áreas de física e matemática. Contudo, a obra não tem por finalidade servir como livro texto para o estudo destes assuntos. Apresenta-se um resumo da teoria e do formulário relativo a cada assunto, sem que se entre em detalhes a respeito de deduções e considerações relativas aos mesmos - isto pode ser obtido junto aos livros citados na bibliografia, muitos deles clássicos no asssunto a que se referem.

A finalidade deste livro consiste em fornecer ferramentas para processamento de dados e obtenção de gráficos relativos aos diversos assuntos abordados, os quais são apenas citados ou exemplificados nos livros que normalmente tratam do assunto. A utilização do computador, em conjunto com software adequado, permite computar valores e obter gráficos que seriam inviáveis ou extremamente trabalhosos de outra forma devido ao volume e complexidade de cálculos necessários.

Em cada capítulo apresenta-se a listagem do programa utilizado e a análise do mesmo. São também apresentados exercícios que podem ser resolvidos com o auxílio do programa e propostos outros para que o usuário resolva (as respostas são fornecidas). Alguns destes problemas são clássicos e outros bastante originais.

Para os que costumam enxergar apenas as dificuldades, gostaria de esclarescer que não é necessário o conhecimento de cálculo integral para se entender o que é a Série Trigonométrica de Fourier e efetuar a síntese de formas de onda a partir dos coeficientes. Também não é necessário dominar a Transformada de Laplace para se analisar circuitos com o auxílio da variável s. Basta considerar a reatância indutiva como sendo s.L e a reatância capacitiva como 1/(s.C), fazendo-se ao final de tudo, s = j.w .

Agora que você chegou até aqui não precisa ler o restante do prefácio, porque vou usá-lo para dizer para a Suzi que fico muito contente com sua compreensão em relação ao tempo que esta obra tomou e pelo apoio que me deu durante o seu desenvolvimento.

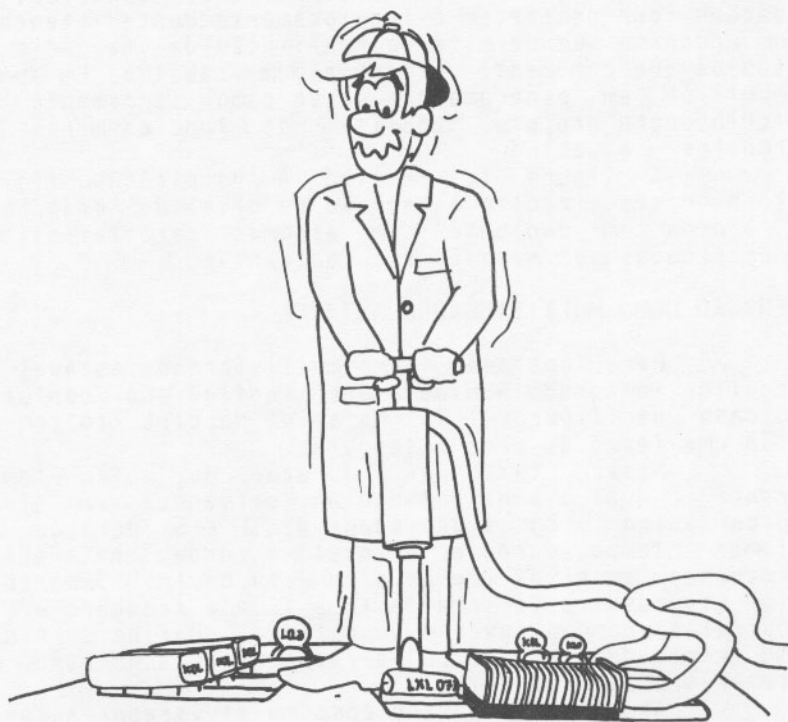
E quanto ao Dalton, ao Renato e o Sérgio digo isto: Tomem nota!!! Esta só eles vão enterder.

Raul Marques Pereira Friedmann

Engenheiro Eletrônico

Professor do Departamento
Acadêmico de Eletrônica do
Centro Federal de Educação
Tecnológica do Paraná
(CEFET-PR)

CAP. 1

Multivibradores com o Circuito Integrado 555

MULTIVIBRADORES COM O CIRCUITO INTEGRADO 555

RESUMO DA TEORIA

O circuito integrado 555 é, sem dúvida alguma, o circuito integrado de temporização de maior popularidade no mercado eletrônico. Por trás deste fato há uma série de razões, por exemplo a sua versatilidade, precisão, baixo custo e fácil disponibilidade.

Praticamentes todos os circuitos eletrônicos que utilizam o circuito integrado 555 configuram-no como multivibrador astável ou monoestável, acrescido de alguns componentes externos para interfaceamento com outros dispositivos e sistemas. Os exemplos de aplicação deste circuito integrado são inúmeros e foge ao assunto deste livro comentá-los.

Analisam-se neste capítulo as condições e equações que descrevem o funcionamento deste integrado e um programa que permite a realização de uma série de cálculos que comumente exigem algum trabalho. Em suma, discute-se um programa que serve como ferramenta de cálculo para projeto, análise de funcionamento de circuitos e estudo.

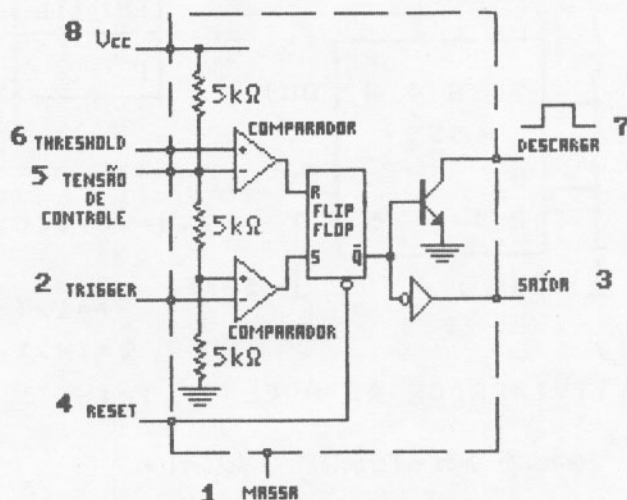
A figura 1.1 mostra a construção física interna deste circuito integrado (a nível de diagrama) de blocos em conjunto com algumas características especificadas nos manuais dos fabicantes.

OPERAÇÃO COMO MULTIVIBRADOR ASTÁVEL

Para operação como multivibrador astável o circuito integrado 555 deve ser configurado conforme indicado na figura 1.2. Na saída do circuito tem-se então uma forma de onda retangular.

Neste texto a duração do vale (tempo durante o qual a onda retangular permanece em nível lógico baixo - 0) é designada de TL e a duração do patamar (tempo durante o qual a onda retangular permanesce em nível lógico alto - 1) de TH. O período total (T) resulta da soma de TH e TL e a frequência (f) é calculada como o inverso do período. Define-se ainda como ciclo de trabalho (D) a razão entre a duração do patamar e o período total.

Ao ser configurado como multivibrador astável a duração do patamar é determinada pelos componentes

Figura 1.1 - Diagrama de Blocos e Características do 555.

- Temporização ajustável de us a horas.
- Ciclo de trabalho ajustável.
- Operação em modo astável e monoestável.
- Fornecimento máximo de corrente na saída de 200 mA.
- Estabilidade de temperatura de 0,005% / ºC.
- Compatibilidade com lógica TTL (VCC=+5V).
- Saída ligada ou desligada.
- Alimentação de +9V a +18V.

R1, R2 e C e a duração do vale somente por R2 e C. Em condições normais não é aplicada externamente nenhuma tensão ao terminal de controle (pino 5) e a forma de onda da tensão sobre o capacitor consiste de duas exponenciais, uma crescente e uma decrescente, cujos valores extremos se situam em VCC.1/3 e VCC.2/3. A partir das formas de onda da tensão sobre o capacitor e da tensão de saída, da constatação de que no patamar a constante de tempo do circuito é determinada pelo produto (R1+R2).C e que no vale é determinada pelo produto R2.C pode-se deduzir as equações que descrevem

Figura 1.2 - 555 como Multivibrador Astável.

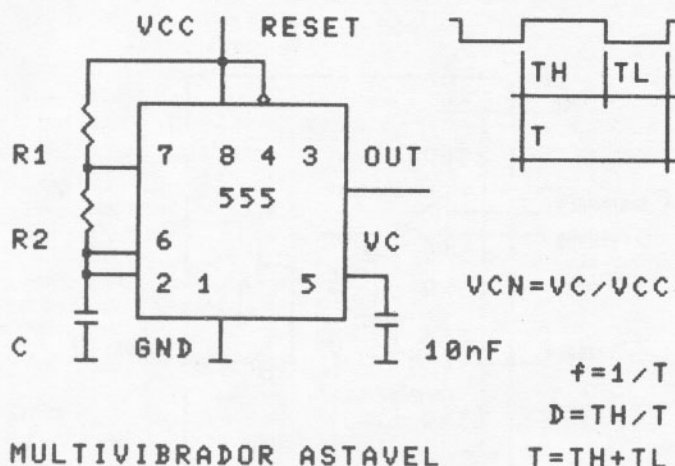
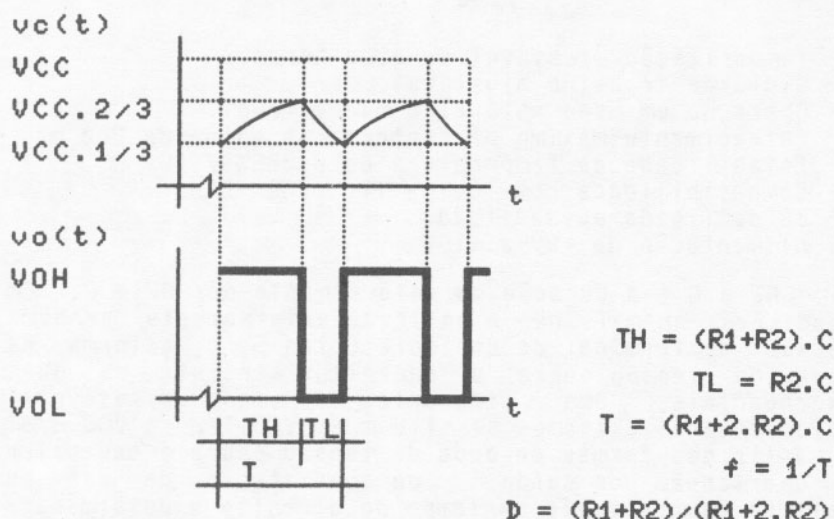
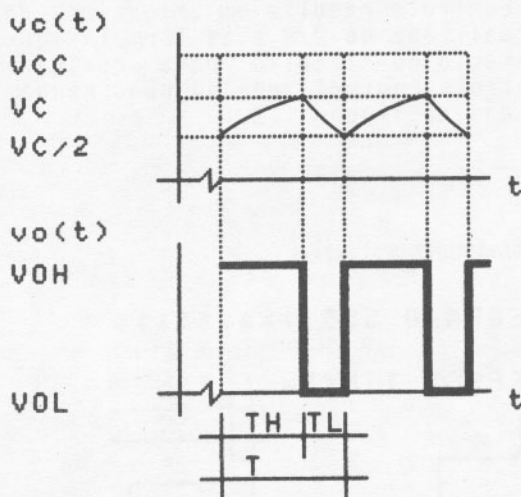



Figura 1.3 - Formas de Onda e Formulário - Astável *.

* OBSERVAÇÃO - Sem tensão de controle externa no pino 5

o comportamento do circuito Estas equações estão relacionadas na figura 1.3 em conjunto com as formas de onda da tensão de saída e da tensão sobre o capacitor.

A aplicação de uma tensão externa ao terminal de controle pode modificar bastante esta situação. A tensão sobre o capacitor consiste ainda de duas exponencias, porém os valores extremos passam a se situar em VC e VC.1/2. A relação da forma de onda da tensão no capacitor com a da tensão de saída e as constantes de tempo permanecem, porém, inalteradas. O comportamento do circuito pode ser descrito pelas fórmulas representadas na figura 1.4.

Figura 1.4 - Formas de Onda e Formulário - Astável *.

$$K = (VCC-VC/2)/(VCC-VC) \qquad *K = (1-VCN/2)/(1-VCN)$$

$$TH = (R1+R2).C.\ln K \qquad *TH = (R1+R2).C.\ln K$$

$$TL = R2.C \qquad *TL = R2.C$$

$$T = (R1.\ln K+R2.(\ln K+\ln 2)).C \qquad *T = (R1.\ln K+R2.(\ln K+\ln 2)).C$$

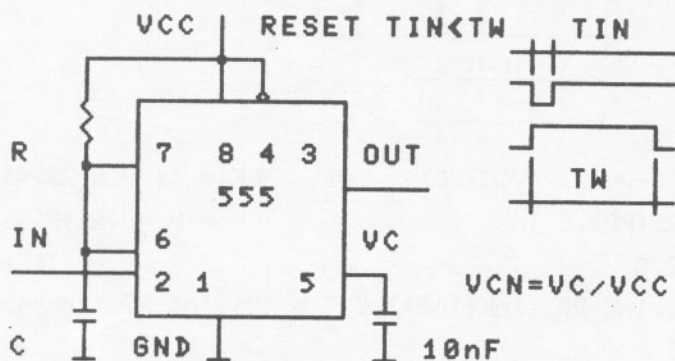
$$f = 1/T \qquad *f = 1/T$$

$$D = \frac{(R1+R2).\ln K}{R1.\ln K+R2.(\ln K+\ln 2)} \qquad *D = \frac{(R1+R2).\ln K}{R1.\ln K+R2.(\ln K+\ln 2)}$$

* OBSERVAÇÃO - Com tensão de controle externa no pino 5

Uma análise mais atenta das equações relacionadas na figura 1.4 irá demonstrar que o comportamento do circuito depende, na verdade, da razão entre a tensão aplicada externamente ao terminal de controle e a tensão de alimentação do circuito (VC/VCC). Por uma questão de facilidade define-se este valor como tensão de controle normalizada (em relação a tensão da fonte de alimentação), que será designada de VCN. As equações que descrevem o comportamento do circuito em função da tensão de controle normalizada (VCN) também encontram-se na figura 1.4.

Observe-se que na ausência da aplicação de uma tensão externa ao terminal de controle a mesma é fixada internamente em VCC.2/3. A utilização deste valor da tensão de controle resulta em um valor da tensão de controle normalizada de 2/3 e as fórmulas que descrevem o comportamento do circuito para qualquer valor da tensão de controle (normalizada ou não) recaem nas equações apresentadas na figura 1.3.

Figura 1.5 - 555 como Multivibrador Monoestável.

OPERAÇÃO COMO MULTIVIBRADOR MONOESTÁVEL

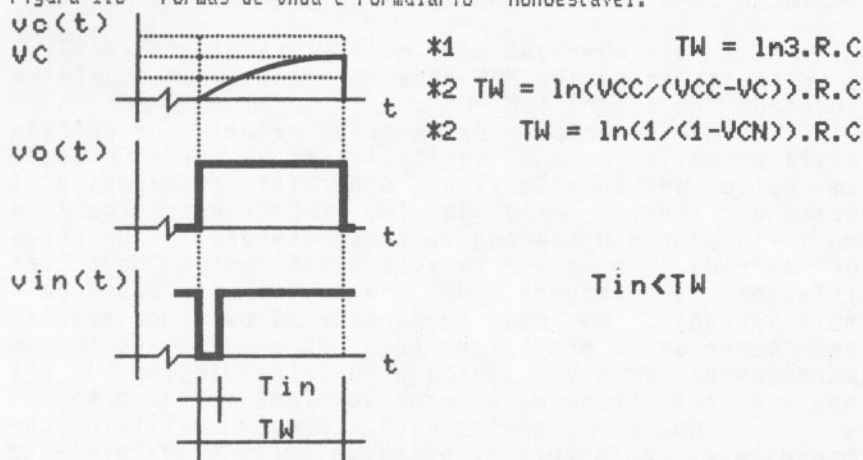
Para operação como multivibrador monoestável o circuito integrado 555 deve ser configurado conforme indicado na figura 1.5.

Na ocorrência de um pulso negativo na entrada deste circuito (pino 2) desenvolve-se na saída (pino 3) um pulso de duração fixa. A duração deste pulso é designada neste texto de TW. Observe-se que o multivibrador é disparado na rampa descendente do pulso de entrada e que a largura deste pulso deve ser inferior à largura de pulso propiciada pelo multivibrador. No caso da duração do pulso de entrada ser superior a propiciada pelo 555 a saída do mesmo permanescerá em nível lógico alto (nível lógico 1) até que a entrada (pino 2) retorne ao nível lógico alto.

Quando configurado como multivibrador monoestável a largura do pulso de saída é determinada pelo resistor R e pelo capacitor C. Em condições normais não é aplicada externamente nenhuma tensão ao terminal de controle (pino 5) e a forma de onda da tensão sobre o capacitor (após a ocorrência de um pulso de disparo) consiste de uma exponencial crescente cujos valores extremos se situam em 0 e VCC. A partir da forma de onda da tensão sobre o capacitor e do fato que a constante de tempo do circuito é determinada pelo produto R.C pode-se deduzir a equação que descreve a largura do pulso de saída. As formas de onda envolvidas e a fórmula citada encontram-se na figura 1.6.

A aplicação de uma tensão externa ao terminal de controle também modifica a atuação do 555 como multivibrador monoestável. A tensão sobre o capacitor continua a ser uma exponencial crescente, porém com valores extremos 0 e VC. A largura de pulso TW é então descrita pela equação representada ao final da figura 1.6, onde já se considerou a tensão de controle normalizada em relação a tensão da fonte de alimentação (VCN = VC/VCC).

Observe-se que, semelhantemente ao que ocorria para o 555 configurado como multivibrador astável na ausência da aplicação de uma tensão externa ao terminal de controle a mesma é fixada internamente em VCC.2/3 (que corresponde a VCN = 2/3). A utilização deste valor de tensão na fórmula em que se descreve a largura de pulso como uma função da tensão resulta na fórmula anterior (sem VCN).

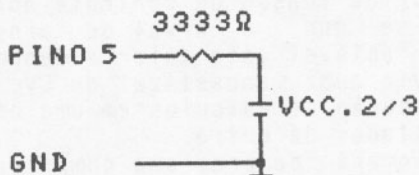
Figura 1.6 - Formas de Onda e Formulário - Monoestável.

OBSERVAÇÃO 1 - Sem tensão de controle externa no pino 5.
OBSERVAÇÃO 2 - Com tensão de controle externa no pino 5.

CONSIDERAÇÕES SOBRE A TENSÃO DE CONTROLE

A utilização de uma tensão externa aplicada ao terminal de controle do 555 permite a alteração das suas características de temporização, seja como multivibrador astável, seja como multivibrador monoestável. Este recurso permite a execução de muitas possibilidade comumente mais trabalhosas, por exemplo osciladores controlados por tensão e circuitos moduladores por frequência, largura e posição de pulso.

Para utilização adequada deste recurso torna-se conveniente a determinação do circuito equivalente do terminal de controle (pino 5).

Pode-se determinar este circuito por meio do teorema de Thevenin a partir do diagrama de blocos da figura 1.1. Assumindo-se que a impedância de entrada dos comparadores é suficientemente alta para ser desprezada em relação ao resistor de 5 kohms que compõe o divisor de tensão interno, pode-se afirmar que a tensão desenvolvida no pino 5 (em relação à massa) é VCC.2/3. Com base na mesma hipótese pode-se obter a impedância do circuito equivalente como sendo 5 kohms // (5 kohms + 5 kohms) = 3.333 kohms.

Figura 1.7 - Circuito Equivalente do Terminal de Controle.

ATUAÇÃO DO PROGRAMA

O programa apresentado neste capítulo atua basicamente como uma ferramenta de cálculo para circuitos eletrônicos que utilizem o circuito integrado 555.

A partir de um menu principal pode-se acessar as opções de cálculos no multivibrador astável, cálculos no multivibrador monostável, traçado do diagrama esquemático do multivibrador astável e traçado do diagrama esquemático do multivibrador monoestável.

As escolhas das opções de cálculo resultam em menus que relacionam os elementos e possibilidades de cálculo envolvidas. Para a configuração multivibrador astável os elementos envolvidos são VCN, R1, R2, C, TL, TH, T, f e D. Para a configuração multivibrador monoestável sao VCN, R, C e TW. Para apreciação das possibilidades de cálculo envolvidas aconselha-se o acompanhamento dos exercícios onde há transcrições de todos os menus que aparecem no programa. Observe-se que o valor de VCN é inicializado pelo programa em seu valor usual (2/3), que corresponde a não aplicação de uma tensão externa ao terminal de controle.

As escolhas das opções de traçado dos diagramas esquemáticos os apresenta na tela em conjunto com informações adicionais de cada configuração. Para escape destas telas gráficas aciona-se a barra de espaços.

ANÁLISE DO PROGRAMA

Na linha de número 1000 define-se a tela em modo texto com 40 colunas e desliga-se a listagem das teclas de função (SCREEN 0:WIDTH 40:KEYOFF). Define-se também o valor da tensão de controle normalizada como 2/3. Observe-se que, a nível de programa, para o multivibrador astável este valor é denominado de VC e para o multivibrador monoestável de CV. Isto é feito para que a execução de cálculos em uma opção não altere dados ou resultados de outra.

O segmento de programa compreendido entre as linhas 1010 e 1060 é responsável pela apresentação do menu principal e pelo direcionamento da execução do programa conforme opção definida pelo usuário.

O segmento de programa compreendido entre as linhas 1500 e 1710 realiza o exposto no parágrafo anterior para o menu de cálculos no multivibrador astável.

As linhas 1800 a 1880 permitem a entrada dos dados para cálculo e entre as linhas 2000 e 2110 são realizados os cálculos. As linhas referidas encerram todas as opções disponíveis no menu de cálculos no multivibrador astável. A escolha de uma opção neste menu direciona a execução do processamento conforme especificado na linha 1710. Após uma entrada de dado ou execução de um cálculo apresenta-se o menu atualizado.

O segmento de programa compreendido entre as linhas 3000 e 3110 é responsável pela apresentação do menu de cálculos no multivibrador monoestável e pelo direcionamento da execução do programa conforme opção definida pelo usuário.

As linhas 3200 a 3240 permitem a entrada dos dados para cálculo e entre as linhas 3300 e 3340 são realizadas os cálculos.

O segmento de programa compreendido entre as linhas 3800 e 3840 é responsável pelo traçado do diagrama esquemático do multivibrador astável e o compreendido entre as linhas 3900 e 3930 pelo do multivibrador monoestável. Nos dois casos parte do desenho é executado pelo segmento entre as linhas 4100 e 4150.

O escape de tela gráfica pelo acionamento da barra de espaços é processado na sub-rotina compreendida entre as linhas 4000 e 4030.

```
100 REM ******************************
110 REM *                            *
120 REM * PROGRAMA APLICATIVO PARA CA *
130 REM * LCULO DE MULTIVIBRADORES CO *
140 REM * M O CIRCUITO INTEGRADO  555 *
150 REM * VERSAO 3.0 MSX NOVEMBRO  87 *
160 REM * RAUL M. P. FRIEDMANN ****** *
180 REM * CURITIBA * PARANA BRASIL ** *
190 REM *                            *
200 REM ******************************
1000 SCREEN 0:WIDTH 40:KEYOFF:VC=2/3:CV=
2/3:REM MENU PRINCIPAL
1010 SCREEN 0:PRINT"CIRCUITO INTEGRADO 5
55 ****************
                    CALCULOS  EM  CIRCUT
OS   MULTIVIBRADORES":PRINT
1020 PRINT"01 - MULTIVIBRADOR ASTAVEL ..
.. CALCULOS"
1030 PRINT"02 - MULTIVIBRADOR MONOESTAVE
L  CALCULOS"
1040 PRINT"03 - MULTIVIBRADOR ASTAVEL ..
.. DIAGRAMA"
1050 PRINT"04 - MULTIVIBRADOR MONOESTAVE
L  DIAGRAMA":PRINT
1060 INPUT"OPCAO ";OP:IF OP<1 OR OP>4 OR
 OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO 1000 ELSE ON OP
 GOTO 1500,3000,3800,3900
1500 SCREEN 0:WIDTH 40:PRINT"01 - VCN =
";:PRINT USING"+#.###^^^^";VC;:PRINT" [
 1 ]"
1510 PRINT"02 - R1  = ";:PRINT USING"+#.
###^^^^";R1;:PRINT" [  Ω ]"
1520 PRINT"03 - R2  = ";:PRINT USING"+#.
###^^^^";R2;:PRINT" [  Ω ]"
1530 PRINT"04 - C   = ";:PRINT USING"+#.
###^^^^";C;:PRINT" [  F ]"
1540 PRINT"05 - TL  = ";:PRINT USING"+#.
###^^^^";TL;:PRINT" [  s ]"
1550 PRINT"06 - TH  = ";:PRINT USING"+#.
###^^^^";TH;:PRINT" [  s ]"
1560 PRINT"07 - T   = ";:PRINT USING"+#.
###^^^^";T ;:PRINT" [  s ]"
1570 PRINT"08 - f   = ";:PRINT USING"+#.
###^^^^";F ;:PRINT" [ Hz ]"
1580 PRINT"09 - D   = ";:PRINT USING"+#.
###^^^^";D ;:PRINT" [  1 ]":PRINT
```

```
1590 PRINT"10 - VCN R1 R2 C TH TL T f D
->"
1600 PRINT"11 - VCN R1 ** C ** ** T * *
->"
1610 PRINT"12 - VCN R1 ** C ** ** * f *
->"
1620 PRINT"13 - VCN ** R2 C ** ** T * *
->"
1630 PRINT"14 - VCN ** R2 C ** ** * f *
->"
1640 PRINT"15 - VCN ** ** C TL TH * * *
->"
1650 PRINT"16 - VCN ** ** C ** ** T * D
->"
1660 PRINT"17 - VCN ** ** C ** ** * f D
->"
1670 PRINT"18 - VCN R1 R2 * ** ** T * *
->"
1680 PRINT"19 - VCN R1 R2 * ** ** * f *
->"
1690 PRINT"20 - *** R1 R2 C ** ** T * *
->":PRINT
1700 OP=21:LOCATE 32,0:PRINT"OPCAO ":LOC
ATE 32,2:INPUT OP:IF OP<1 OR OP>21 OR OP
-FIX(OP)<>0 THEN GOTO 1500 ELSE LOCATE 0
,23
1710 ON OP GOTO 1800,1810,1820,1830,1840
,1850,1860,1870,1880,2010,2020,2030,2040
,2050,2060,2070,2080,2090,2100,2110,1000

1800 INPUT"VCN       ";VC:IF VCN<=0 OR VCN>
=1 THEN GOTO 1800 ELSE GOTO 1500
1810 INPUT"R1        ";R1:GOTO 1500
1820 INPUT"R2        ";R2:GOTO 1500
1830 INPUT"C         ";C:GOTO 1500
1840 INPUT"TL        ";TL:GOTO 1500
1850 INPUT"TH        ";TH:GOTO 1500
1860 INPUT"T         ";T:GOTO 1500
1870 INPUT"f         ";F:GOTO 1500
1880 INPUT"D         ";D:GOTO 1500
2000 REM CALCULOS ASTAVEL
2010 K=(1-VC/2)/(1-VC):TH=(R1+R2)*C*LOG(
K):TL=R2*C*LOG(2):T=TL+TH:F=1/T:D=TH/T:G
OTO 1500
2020 K=(1-VC/2)/(1-VC):R2=(T-R1*C*LOG(K)
)/(C*(LOG(K)+LOG(2))):GOTO 2000
```

```
2030 T=1/F:GOTO 2020
2040 K=(1-VC/2)/(1-VC):R1=(T-R2*C*(LOG(K
)+LOG(2)))/(C*LOG(K)):GOTO 2000
2050 T=1/F:GOTO 2040
2060 K=(1-VC/2)/(1-VC):R2=TL/(C*LOG(2)):
R1=(TH-R2*C*LOG(K))/(C*LOG(K)):GOTO 2000

2070 TL=(1-D)*T:TH=D*T:GOTO 2060
2080 T=1/F:GOTO 2070
2090 K=(1-VC/2)/(1-VC):C=T/(R1*LOG(K)+R2
*LOG(K)+R2*LOG(2)):GOTO 2000
2100 T=1/F:GOTO 2090
2110 KV=EXP((T-R2*C*LOG(2))/((R1+R2)*C))
:VC=(1-KV)/(1/2-KV):GOTO 2000
3000 REM MENU DO MULTIVIBRADOR MONOESTAV
EL
3010 SCREEN 0:PRINT"CIRCUITO INTEGRADO 5
55 *****************
                    CALCULOS EM MULTIVIB
RADORES MONOESTAVEIS":PRINT
3020 PRINT"01 - VCN  = ";:PRINT USING"+#.
###^^^^";CV;:PRINT" [  1 ]"
3030 PRINT"02 - R    = ";:PRINT USING"+#.
###^^^^";RR;:PRINT" [  Ω ]"
3040 PRINT"03 - C    = ";:PRINT USING"+#.
###^^^^";CC;:PRINT" [  F ]"
3050 PRINT"04 - TW   = ";:PRINT USING"+#.
###^^^^";TW;:PRINT" [  s ]":PRINT
3060 PRINT"05 - VCN R C ** ->  TW"
3070 PRINT"06 - VCN R * TW ->   C"
3080 PRINT"07 - VCN * R TW ->   R"
3090 PRINT"08 - *** R C TW -> VCN":PRINT

3100 PRINT"09 - MENU    PRINCIPAL":PRINT
:PRINT
3110 OP=9:INPUT"OPCAO     ";OP:IF OP<1 OR
 OP>8 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO 1000
3120 PRINT:ON OP GOTO 3210,3220,3230,324
0,3310,3320,3330,3340,1000
3200 REM ENTRADAS DE DADOS MONOESTAVEL
3210 INPUT"VCN          ";CV:GOTO 3000
3220 INPUT"R            ";RR:GOTO 3000
3230 INPUT"C            ";CC:GOTO 3000
3240 INPUT"TW           ";TW:GOTO 3000
3300 REM CALCULOS MONOESTAVEL
3310 TW=RR*CC*LOG(1/(1-CV)):GOTO 3000
```

```
3320 CC=TW/(RR*LOG(1/(1-CV))):GOTO 3000
3330 RR=TW/(CC*LOG(1/(1-CV))):GOTO 3000
3340 CV=1-EXP(-(TW/(RR*CC))):GOTO 3000
3800 REM DESENHO DO MULTIVIBRADOR ASTAVE
L
3810 GOSUB 4100:DRAW"BM28,120U1R1D2L2U2R
1D1R20L20U16E2H4E4H4E2U8BM168,24R4D8R24U
8R32D8R24U8R4L4D8BD4D44U4R4L64R4D4U44D16
L4R36U16D20U4R28"
3820 OPEN"GRP:" FOR OUTPUT AS #1:PRESET(
200,40):PRINT#1,"TH  TL":PRESET(200,64):
PRINT#1,"T":PRESET(216,152):PRINT#1,"f=1
/T":PRESET(208,168):PRINT#1,"D=TH/T":PRE
SET(0,184):PRINT#1,"MULTIVIBRADOR ASTAVE
L     T=TH+TL"
3830 PRESET(0,72):PRINT#1,"R1":PRESET(0,
104):PRINT#1,"R2":CLOSE#1
3840 GOSUB 4000:GOTO 1000
3900 REM DESENHO DO MULTIVIBRADOR MONOES
TAVEL
3910 GOSUB 4100:DRAW"BM28,112U32D40R20L5
6BM200,32D12U8L8R16U4D12U8R48BD12L48D8L8
U8L8BD24R8U8R48D8R8BD20L8U16D20U4L48U16D
20U4L8"
3920 OPEN"GRP:" FOR OUTPUT AS #1:PRESET(
144,24):PRINT#1,"TIN<TW   TIN":PRESET(21
6,80):PRINT#1,"TW":PRESET(0,72):PRINT#1,
"R":PRESET(0,104):PRINT#1,"IN":PRESET(0,
184):PRINT#1,"MULTIVIBRADOR MONOESTAVEL
******":CLOSE#1
3930 GOSUB 4000:GOTO 1000
4000 REM SUBROTINA PARA ESCAPE DE TELA G
RAFICA ATRAVES DO ACIONAMENTO DA BARRA D
E ESPACOS
4010 RT=1:ON STRIG GOSUB 4030:STRIG(0)
ON
4020 IF RT=1 THEN GOTO 4020 ELSE RETURN
4030 STRIG(0) OFF:RT=0:RETURN
4100 REM SUBROTINA DE DESENHO BASE
4110 SCREEN 2:DRAW"BM24,152R8L4U14R4L8R4
BU4R4L8R4U22U1R1D2L2U2R1D1R20U32L20U1R1D
2L2U2R1D1U8E2H4E4H4E2U16R52U1R1D2L2U2R1D
1U16D32U16R16D12F2G2H2E2F2G2R32D32R32L32
D32R16D14R4L8R4BD4R4L8R4D14R4L8R4BU32L16
D16L48D16R4L8R4U16L32U80R48"
4120 OPEN"GRP:" FOR OUTPUT AS #1
```

```
4130 PRESET(0,0):PRINT#1,"CIRCUITO INTEG
RADO 555 *********":PRESET(48,24):PRINT#
1,"VCC   RESET":PRESET(56,72):PRINT#1,"7
  8 4 3  OUT":PRESET(80,88):PRINT#1,"555
"
4140 PRESET(56,104):PRINT#1,"6          V
C":PRESET(56,120):PRINT#1,"2 1     5
  VCN=VC/VCC":PRESET(0,144):PRINT#1,"C
   GND              10nF":CLOSE#1
4150 RETURN
```

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

01 - Um circuito integrado 555 é configurado como multivibrador astável conforme indicado na figura 1.2. Os componentes utilizados são R1 = R2 = 3.3 kohms e C = 150 nF. A tensão de alimentação VCC vale 10 V. Calcular TL, TH, T, f e D. Nenhuma tensão externa é aplicada ao terminal de controle (pino 5).

A execução do programa resulta inicialmente no menu apresentado na figura 1.8. A escolha da opção de traçado do diagrama esquemático resulta na figura 1.2.

Acessando-se a opção de cálculos no multivibrador astável, introduz-se os valores de R1, R2 e C por intermédio das opções 2, 3 e 4, respectivamente. Observe-se que o valor de VCN, sem que nenhum valor houvesse sido introduzido, é igual a 0,6667 (2/3), o que corresponde a situação de nenhuma tensão externa aplicada ao terminal de controle. A informação do valor da tensão de alimentação neste caso é irrelevante. A opção 10 permite a execução dos cálculos solicitados a partir dos dados fornecidos. Após a execução da opção 10 obtém-se a tela da figura 1.9. O retorno ao menu principal é obtido teclando-se simplesmente RETURN ao invés da opção desejada.

Figura 1.8 - Menu Principal.

```
CIRCUITO INTEGRADO 555 *****************
CALCULOS  EM  CIRCUTOS   MULTIVIBRADORES

01 - MULTIVIBRADOR ASTAVEL .... CALCULOS
02 - MULTIVIBRADOR MONOESTAVEL  CALCULOS
03 - MULTIVIBRADOR ASTAVEL .... DIAGRAMA
04 - MULTIVIBRADOR MONOESTAVEL  DIAGRAMA

OPCAO ? █
```

Figura 1.9 - Menu de Cálculos no Multivibrador Astável.

```
01 - VCN = +6.667E-01 [  1 ]    OPCAO
02 - R1  = +3.300E+03 [  Ω ]
03 - R2  = +3.300E+03 [  Ω ]    ? █
04 - C   = +1.500E-07 [  F ]
05 - TL  = +3.431E-04 [  s ]
06 - TH  = +6.862E-04 [  s ]
07 - T   = +1.029E-03 [  s ]
08 - f   = +9.715E+02 [ Hz ]
09 - D   = +6.667E-01 [  1 ]

10 - VCN R1 R2 C TH TL T f D ->
11 - VCN R1 ** C ** ** T * * ->
12 - VCN R1 ** C ** ** * f * ->
13 - VCN ** R2 C ** ** T * * ->
14 - VCN ** R2 C ** ** * f * ->
15 - VCN ** ** C TL TH * * * ->
16 - VCN ** ** C ** ** T * D ->
17 - VCN ** ** C ** ** * f D ->
18 - VCN R1 R2 * ** ** T * * ->
19 - VCN R1 R2 * ** ** * f * ->
20 - *** R1 R2 C ** ** T * * ->
```

02 - No circuito do problema 1 aplica-se uma tensão externa ao terminal de controle variando de 1 a 9 V de 1 em 1 V. Obter para cada uma dos valores da tensão aplicada TL, TH, T, f e D.

De acordo com o enunciado do problema as tensões aplicadas ao terminal de controle serão 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 V, que, divididas pela tensão de alimentação de 10 V, resultam nos valores da tensão de controle normalizada 0,1 , 0,2 , 0,3 , 0,4 , 0,5 , 0,6 , 0,7 , 0,8 e 0,9.

Como os valores dos resistores e do capacitor não se alteram, basta reintroduzir-se o valor da tensão de controle normalizada, por intermédio da opção 1 e obter-se os parâmetros especificados, por intermédio da opção 10.

A colocação dos valores obtidos para os diversos casos sob forma de tabela resulta como apresentado a seguir. É conveniente lembrar que no programa todos os valores envolvidos são apresentados em notação científica, de modo a representar mais facilmente os valores envolvidos, independentemente de sua ordem de grandeza.

VC	VNC	TL [us]	TH [us]	T [us]	f [Hz]	D [1]
1	0,1	343,1	53,53	396,6	2521	0,1350
2	0,2	343,1	116,6	459,7	2175	0,2536
3	0,3	343,1	192,2	535,3	1868	0,3591
4	0,4	343,1	284,8	627,9	1593	0,4536
5	0,5	343,1	401,4	744,5	1343	0,5392
6	0,6	343,1	554,0	897,1	1115	0,6175
7	0,7	343,1	765,5	1109	902,1	0,6905
8	0,8	343,1	1088	1431	698,9	0,7602
9	0,9	343,1	1688	2031	492,4	0,8310

Pode-se verificar alguns fatos interessantes a partir da tabela exposta.

A duração do vale (nível lógico baixo - TL), não se altera com a variação de VCN. Este fato pode ser comprovado analiticamente, verificando-se que a fórmula de TL não depende de forma alguma de VCN.

A duração do patamar (nível lógico alto - TH), sofre alterações em função de VCN e, consequentemente serão alterados o período total (T), a frequência de oscilação (f) e o ciclo de trabalho D. A razão entre a maior e a menor frequência obtida neste caso é de 2521 / 492,4 = 5,120.

O ciclo de trabalho também sofre grande variação, variando de 0,1350 a 0,8310. Observe-se com isto que com o 555 é possível a obtenção de formas de onda quadrada, ou seja, com ciclo de trabalho de 0,5 (50 por cento), o que comumente se afirma não ser possível, em algumas obras e artigos que, pretensamente didáticos, não passam de análises muito superficiais. Observe-se, por exemplo, que neste caso uma tensão de controle normalizada VCN = 0,4531 (no caso VC = 4,531 V pois VCC = 10 V) acarreta um ciclo de trabalho de 0,5 (50 por cento). Na realidade estes valores de VCN e D podem ser extendidos para qualquer multivibrador astável em que R1 = R2.

03 - Com os valores de R1, R2 e C utilizados no multivibrador astável do exercício 1 pretende-se obter uma frequência de oscilação de exatamente 1000 Hz. Determinar o valor da tensão de controle necessária para isto, admitindo-se que os componentes possuam valores exatamente iguais ao nominais.

A opção 20 permite a obtenção do valor da tensão de controle normalizada necessária para a obtenção de um período T a partir dos valores de R1, R2 e C especificados.

O período T correspondente a frequência especificada é obtido pela inversão do período, ou seja, T = 1/1000 = 0,001 = 1 ms. A introdução dos valores de R1, R2, C e T, seguida da escolha da opção 20 (menu de cálculos no multivibrador astável), resulta na tela apresentada na figura 1.10.

O valor VCN = 0,6532 corresponde a tensão de controle normalizada em relação a tensão de alimentação. O valor da tensão de controle necessária para tal é VC = VCN.VCC = 0,6532.10 = 6,532 V admitindo-se que VCC = 10 V.

Figura 1.10 - Problema 3.

```
01 - VCN = +6.532E-01 [  1 ]    OPCAO
02 - R1  = +3.300E+03 [  Ω ]
03 - R2  = +3.300E+03 [  Ω ]    ? █
04 - C   = +1.500E-07 [  F ]
05 - TL  = +3.431E-04 [  s ]
06 - TH  = +6.569E-04 [  s ]
07 - T   = +1.000E-03 [  s ]
08 - f   = +1.000E+03 [ Hz ]
09 - D   = +6.569E-01 [  1 ]

10 - VCN R1 R2 C TH TL T f D ->
11 - VCN R1 ** C ** ** T * * ->
12 - VCN R1 ** C ** ** * f * ->
13 - VCN ** R2 C ** ** T * * ->
14 - VCN ** R2 C ** ** * f * ->
15 - VCN ** ** C TL TH * * * ->
16 - VCN ** ** C ** ** T * D ->
17 - VCN ** ** C ** ** * f D ->
18 - VCN R1 R2 * ** ** T * * ->
19 - VCN R1 R2 * ** ** * f * ->
20 - *** R1 R2 C ** ** T * * ->
```

04 - Para a construção de um multivibrador astável a partir do 555 dispõe-se de um capacitor de 10 nF e um resistor de 10 kohms. Utilizando-se o resistor especificado como R1 e sabendo-se que a fequência deverá ser de 10 kHz e que não há nenhuma exigência com relação ao ciclo de trabalho, determinar o valor de R1 correspondente.

Uma vez inicializado o programa é selecionada a opção de cálculos em multivibradores astáveis, introduz-se os valores de R1, C e f através das opções 2, 4 e 6 respectivamente. A opção 12 permite o obtenção do valor de R1 em função dos valores especificados anteriormente, o que resulta em R2 = 2,213 kohms.

O valor mais próximo disponível comercialmente consiste em 2,2 kohms. Introduzindo-se este valore (2200) através da opção 3 e verificando-se o valor de frequência que o mesmo acarreta, obtém-se f = 10,02 kHz.

O erro obtido ao se utilizar este valor de resistor pode ser expresso por

(10,02 - 10,00) / 10,00 = 0,002 = 0,2 %

Observe-se porém que o erro que se pode ter na frequência de saída está diretamente relacionado a tolerância dos componentes empregados.

05 - Para maior facilidade de produção deseja-se utilizar os dois resistores de temporização - R1 e R2 - de mesmo valor. Determinar o valor dos resistores a serem utilizados e verificar o valor da frequência de oscilação que o valor comercial mais próximo acarreta. Visando aumentar ainda mais a facilidade de produção, pela redução do número de itens de estoque necessários, será utilizado o valor de 10 nF para o capacitor de temporização - este valor é idêntico ao valor do capacitor recomendado pelo fabricante para a estabilização da tensão no terminal de controle. A frequência de oscilação requerida é de 10 kHz.

Como auxílio à solução deste tipo de problema observe-se que, sempre que se utilizam os resistores de temporização R1 e R2 do mesmo valor, e não se aplica externamente nehuma tensão ao terminal de controle o

ciclo de trabalho terá valor D = 2/3 (0,6667).

Introduzindo-se os valores C = 10 nF, f = 10 kHz e D = 0,6667, por intermédio das opções 4, 8 e 9 do menu de cálculos no multivibrador astável, respectivamente, e selecionando-se a opção 17 obtém-se R1 = 4,810 kohms e R2 = 4,809 kohms.

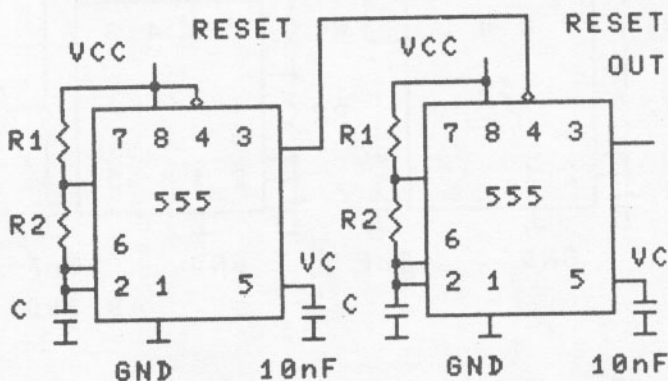
O valor comercial disponível de maior proximidade é de 4,7 kohms. A introdução destes valores por meio das opções 2 e 3, seguida da opção 10 resulta em f = 10,23 kHz.

O erro obtido pela adoção destes valores é

(10,23 - 10,00) / 10,00 = 0,023 = 2,3 por cento

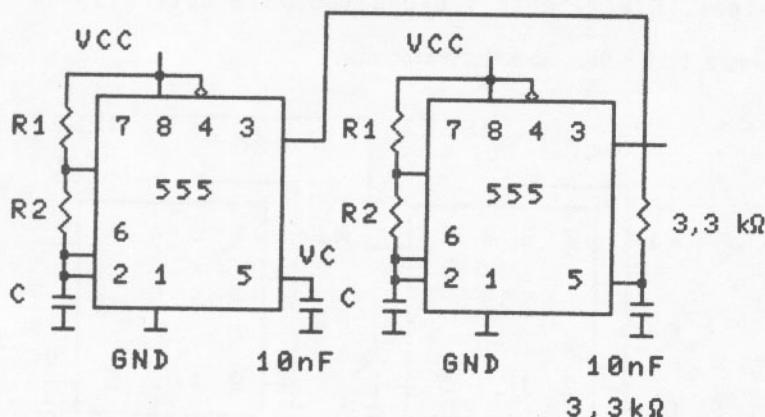
assumindo-se que os valores reais dos componentes sejam idênticos aos nominais.

06 - O diagrama esquemático da figura 1.11 representa um oscilador intermitente constituido por dois multivibradores astáveis construídos a partir do 555. O sinal intermitente é produzido pela aplicação do sinal

Figura 1.11 - Oscilador Intermintente.

de saída do primeiro multivibrador, que funciona em baixa frequência, ao terminal de reset do segundo, que funciona em uma frequência mais elevada, interrompendo periodicamente a sua oscilação. Determinar a frequência do ciclo de trabalho dos sinais de saída dos dois multivibradores.

O primeiro multivibrador, de frequência mais baixa, possui, em sua estrutura de temporização, R1 = R2 = 100 kohms e C = 4,7 uF. A introdução destes valores por meio das opções 2, 3 e 4 do menu de cálculos no multivibrador astável, seguida da opção 10 resulta em f = 1,023 Hz e D = 0,6667 (2/3 - os resistores são iguais e não há aplicação de tensão de controle externa).

O segundo multivibrador, de frequência mais elevada, possui R1 = R2 = 100 kohms e C = 10 nF. Procedendo-se de modo semelhante ao do primeiro multivibrador obtém-se f = 480,9 Hz e D = 0,6667.

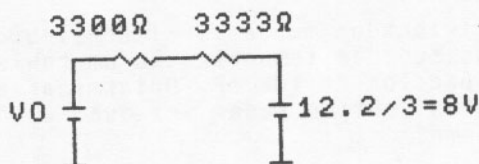
Figura 1.12

R1 = R2 = 100 KΩ
C = 4,7 μF

R1 = R2 = 100 kΩ
C = 10 nF

07 - O oscilador representado na figura 5.11 é modificado, conforme indicado na figura 5.12, de modo a atuar como um oscilador bitonal. A obtenção de dois tons é conseguida pela alteração da tensão de controle do segundo multivibrador por parte do primeiro, o que altera as características de temporização daquele. Determinar as frequências dos dois tons obtidos.

O primeiro multivibrador é idêntico ao do exercício anterior e opera com f = 1,023 Hz.

Como a saída do primeiro multivibrador altera o valor da tensão de controle do segundo, de modo a gerar os dois tons, torna-se necessário, para determinação das frequências correspondentes aos dois tons, conhecer-se o valor da tensão de controle para os dois casos. O circuito equivalente do terminal de controle, pode ser descrito como na figura 1.13. onde V representa a tensão da saída do primeiro multivibrador.

Figura 1.13 - Circuito Equivalente para Obtenção da Tensão no Terminal de Controle (Pino 5)

Com a saída do primeiro multivibrador em nível lógico 0, a tensão de saída pode ser aproximada, sem erro apreciável, para 0 V. A tensão no terminal de controle pode ser expressa por

$$VC = \frac{0/3300 + 8/3333}{1/3300 + 1/3333} = 3.980 \text{ V}$$

A tensão de controle normalizada correspondente é

VCN = VC/VCC = 3,980/12 = 0,3371

A introdução dos valores de VCN, R1, R2 e C, no menu de cálculos no multivibrador astável, seguido da opção 10, resulta em f = 879,9 Hz.

Com a saída do primeiro multivibrador em nível lógico 1, a tensão de saída é, tipicamente, 1,4 V inferior à tensão de alimentação VCC. No caso, com uma tensão de alimentação de 12 V, 10,6 V. A tensão no terminal de controle pode então ser calculada por

$$VC = \frac{10,6/3300 + 8/3333}{1/3300 + 1/3333} = 9,306 \text{ V}$$

que em conjunto com os valores de R1, R2 e C resulta em f = 370,4 Hz.

Tem-se então um oscilador bitonal com frequências de saída de 370,4 Hz e 879,9 Hz.

08 - Um multivibrador monoestável construído com o 555 possui em sua rede de temporização um resistor de 100 kohms e um capacitor de 100 nF. Determinar a duração do pulso de saída obtido cada vez que é disparada a entrada do mesmo.

Uma vez que nenhuma tensão externa é aplicada ao terminal de controle, introduz-se os valores de R e C por meio das opções 2 e 3 do menu de cálculos no multivibrador monoestável, respectivamente, e obtém-se o valor de TW por meio da opção 5, o que resulta em TW = 10,99 ms.

09 - Determinar o valor da tensão de controle que deve ser aplicada externamente ao multivibrador monoestável do exercício anterior de modo que o mesmo gere um pulso de saída com duração de 10 ms, utilizando os mesmos valores de R e C do exercício anterior. A tensão de alimentação é de 15 V.

Mantendo-se os valores de R e C introduzidos no exercício 8, introduzindo-se o valor de TW por meio da opção 4 e executando-se a opção 5 obtem-se VCN = 0,6321.

A tensão de controle externa correspondente é

VC = VCN.VCC = 0,6321.15 = 9,482 V

10 - No multivibrador monoestável do problema 8, aplica-se uma tensão de controle externa no pino 5. Obter a largura de pulso do monoestável variando-se VC de 1,5 a 13,5 V, de 1,5 em 1,5 V. A tensão de alimentação é de 15 V.

Do enunciado tem-se que os valores da tensão de controle aplicados são 1,5 , 3,0 , 4,5 , 6,0 , 7,5 , 9,0 , 12,0 e 13,5V. Sabendo-se que VCC = 15 V, obtem-se os valores correspondentes de VCN, que são 0,1 , 0,2 , 0,3 , 0,4 , 0,5 , 0,6 , 0,7 , 0,8 e 0,9.

Mantendo-se inalterados os valores de R e C, introduzindo-se o valor de VCN por intermédio da opção 1 e obtendo-se TW pela opção 5, para cada valor de VCN proposto, obtem-se a seguinte tabela.

VC [V]	VCN [1]	TW [s]
1,5	0,1	0,1054
3,0	0,2	0,2231
4,5	0,3	0,3567
6,0	0,4	0,5108
7,5	0,5	0,6931
9,0	0,6	0,9163
10,5	0,7	1,204
12,0	0,8	1,609
13,5	0,9	2,303

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

11 - Um circuito integrado 555 é configurado como multivibrador astável conforme indicado na figura 1.2. Os componentes utilizados são R1 = 6,8 kohms, R2 = 3.3 kohms e C = 22 nF. Calcular TL, TH, T, f e D. Nenhuma tensão externa é aplicada ao terminal de controle (pino 5).

Respostas TL = 50,32 us TH = 154,0 us T = 204,3 us

f = 4894 Hz D = 0,7537

12 - Repetir o problema 5 dispondo-se de capacitores de valor 10 nF e desejando-se uma frequência do sinal de saída de 440 Hz.

Respostas R1 = R2 = 109,3 kohms

R1 = R2 = 100 kohms

f = 480,9 Hz

erro = 0,09254 = 9,254 por cento

13 - O resistor de 3,3 kohms do problema 7 é alterado para 10 kohms. Obter os novos valores da tensão de controle, tensão de controle normalizada e frequência correspondentes aos dois tons gerados.

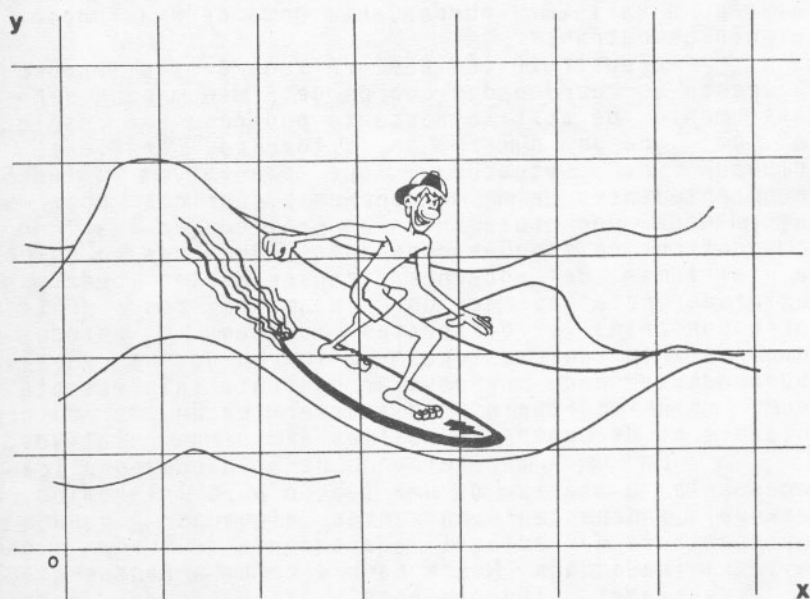
Respostas VC = 6,000 V VCN = 0,5000 f = 664,9 Hz

VC = 8,650 V VCN = 0,7208 f = 425,4 Hz

14 - Um multivibrador monoestável contruído com o 555 possui em sua rede de temporização um resistor de 430 kohms e um capacitor de 2200 uF. Determinar a duração do pulso de saída obtido cada vez que é disparada a entrada do mesmo.

Resposta TW = 1039 s = 17 minutos e 19 segundos

CAP. 2

Análise Gráfica de Funções

ANÁLISE GRÁFICA DE FUNÇÕES

CONSIDERAÇÕES

Os aspectos das análises normalmente efetuadas em funções quaisquer, por exemplo, as simetrias existentes e a determinação de valores máximos e mínimos relativos podem ser realizados por métodos algébricos. A solução de sistemas de equações que envolvam certos tipos de funções, por exemplos funções lineares, também podem ser determinados por meios algébricos.

Porém há um número bastante grande de situações que admitem apenas soluções numéricas aproximadas, que são determinadas de formas mais ou menos trabalhosas em função dos métodos empregados, os quais são amplamente estudados em cálculo numérico e outras disciplinas.

Em outras situações torna-se bastante interessante a análise dos gráficos de uma ou mais funções de mesma variável independente de modo a estudar o comportamento destas funções, tanto em relação a variável independente como de uma função em relação as outras.

A determinação dos gráficos destas funções e o acesso às coordenadas que os determinam pode ser um instrumento de auxílio bastante poderoso na resolucao de um grande número de situações práticas. A solução de equações que envolvam funções transcentedentes e mesmo funções algébricas pode ser determinada por cruzamentos de gráficos destas funções com gráficos de funções constantes, ou ainda, a solução de sistemas de equações transcendentes pode ser realizada pela análise do cruzamento dos gráficos correspondentes a diferentes funções. O estudo do comportamento de uma função em função de sua variável independente pode se revelar bastante interessante e mesmo mais importante que a determinação de valores notáveis ou de pontos de máximos e mínimos relativos.

Em um número elevado de situações práticas é necessária a análise de uma função para intervalos de variável independente bastantes elevados, quando a representação da variável independente de forma linear se torna inadequada. Neste caso é comum a representação da variável independente através de escalas logarítimicas. O mesmo se aplica a variável dependente

quando seu intervalo de variação for bastante elevado. O uso de escalas logarítimicas também é particularmente interessante quando a razão entre dois valores (seja para variável dependente ou para a variável independente) se revelar mais importante que a diferença numérica entre estes dois valores. Observe-se porém que o uso de escalas logarítimicas não admite a representação de valores negativos ou nulos.

ATUAÇÃO DO PROGRAMA

O programa apresentado permite a representação simultânea de até 10 funções de um mesma variável independente. As funções são todas descritas por equações da forma y = f(x) que são definidas no programa em segementos especialmente reservados para este propósito.

A utilização do programa é orientada por um menu.

O programa permite a definição do intervalo de variação da variável independente e o padrão desta variação (linear ou logarítimico). Caso algum segmento da função se revele particularment interessante pode-se redefinir o intervalo de variação.

Para a variável dependente o programa permite a qualquer tempo selecionar quais funções deverão ser apresentadas em um mesmo gráfico. Os valores máximos e mínimos de cada uma destas funções são então apresentados e solicita-se ao usuário os mesmos valores para a formatação do gráfico no eixo y. Os segmentos de cada uma das funções que possuirem valores de y acima do valor máximo ou abaixo do valor mínimo definido para o eixo y não serão representados. O eixo y também pode ter sua variação definida como linear ou logarítimica.

Os recursos de formatação do gráfico são bastante variados e permitem a inclusão de margeamento, divisão das escalas x e y em um número de intervalos definido pelo usuário (o número de intervalos da escala x é independente do número de intervalos da escala y).

Uma situação de alto interesse ocorre quando uma das variáveis a ser representada tem em seu intervalo de variação um número inteiro de décadas, ou seja, a razão entre o valor máximo e o valor mínimo é uma potência inteira de 10. O valor desta potência

expressa o número de décadas. Por exemplo uma variável de valor máximo 1000 e valor mínimo 10 possui um intervalo de variação de 2 décadas (1000 / 10 = 100 e 100 é igual a 10 elevado a potência 2). Durante o processamento, se a variçãa da escala x for definida como logarítimica, o programa testa o intervalo de variação definido para as escalas x e, no caso de existência de uma variação para um número inteiro de décadas permite, se assim definido pelo usuário, a representação de cada década. O mesmo procedimento ocorre de maneira independente para a escala y.

Um recurso de extrema utilidade prática incluído no programa é a inclusão de um marcador de coordenadas que pode ser deslocado sobre cada um das funções em análise. As coordenadas correspondentes são apresentadas na parte inferior do gráfico juntamente com a indicação da função em análise. O deslocamento do marcador de coordenadas (ou cursor gráfico) e o retorno a partir do gráfico são controlados pelas teclas de movimentação do cursor.

Este recurso permite, por exemplo a determinação dos valores de x que acarretam um determinado valor em y ou a situação contrária. Permite ainda a determinação das coordenadas dos pontos de máximos e mínimos relativos da cada função e, pela razão entre as diferenças de coordenadas adajacentes, o valor numérico da derivada da função no ponto considerado. Além do aspecto de permitir a comprovacão numérica de soluções algébricas pode-se então determinar as possibilidades acima para funções cuja análise algébrica fosse bastante trabalhosa ou, o que acontece em alguns casos, impossível.

Adicionalmente o programa permite a determinação dos valores de qualquer uma das funções para valores quaisquer de x. Este recurso é aplicável na procura de valores de x que acarretam um determinado valor em y. Isto também pode ser feito pela análise de funções para um intervalo da variável x progressivamente reduzido.

Todos os valores numéricos apresentados pelo programa são realizados em notação científica, de modo a se adequar a quaisquer intervalos especificados.

ANÁLISE DO PROGRAMA

Na linha 210 define-se o número máximo de arquivos, dimensionam-se as matrizes que armazenarão os valores da variável independente (X!) ,os valores da variáveis dependentes(Y!), as variáveis de indicação de funções em análise(GF$) e as variáveis indicadoras da execução do cálculo das funções (CF), seleciona-se o modo texto com 40 colunas (SCREEN 0:WIDTH 40) e desliga-se a listagem das teclas de função.

Nas linhas 220 e 230 é definido o sprite correspondente ao marcador de coordenadas.

Nas linha 240 são solicitadas ao usuário as cores desejadas para o primeiro plano, fundo e borda e na linha 250 é solicitado o passo de cálculo.

A linha 250 define o "default" do programa, ou seja define as condições iniciais que neste caso são análise apenas da função f0, escalas x e y lineares e formatação dos gráficos apenas com margeamento.

As linhas de número 510 a 990 podem ser usadas para a definição de constantes e de funções que venham a ser utilizadas nas expressões que descrevem as funções definidas no programa. Devido a frequência com que aparecem foram definidas as constantes PI! e E! (base dos logarítimos neperianos).

O segmento de programa compreendido entre as linhas 1000 e 1090 solicita ao usuário os valores mínimo e máximo da variável independente a serem considerados na análise e o tipo de variação da mesma (linear ou logarítimica), efetuando testes das variáveis envolvidas de modo a evitar a ocorrência de condições ilegais.

O segmento de programa compreendido entre as linhas 1500 e 1580 apresenta ao usuário o menu principal e direciona o processamento conforme a opção definida pelo mesmo.

As linhas numeradas de 2500 a 2540 correspondem a opção 1 do menu principal. Neste segmento de programa são definidas as funções em análise.

As linhas numeradas de 3000 a 3140 executam o cálculo dos valores das funções em análise e dos respectivos valores máximos e mínimos. As funções já processadas anteriormente não são recalculadas, de modo a acelerar o processamento.

As linhas numeradas de 3150 a 3290 executam a formatação da tela de apresentação dos valores máximos e mínimos das funções em análise e determinam o valor máximo e o valor mínimo dentre todas as funções em análise, de modo a permitir a escolha de um intervalo de representação adequado para representação das variáveis dependentes. A definição deste intervalo para a escala y e o tipo desta escala (linear ou logarítimica) são definidos entre as linhas 3300 e 3330.

Se a escala y for linear o traçado do gráfico será efetuado entre as linhas 3500 e 3600. No caso da escala y ser logarítimica este processamento será efetuado etre as linhas 4000 e 4100.

A opção 3 do menu principal, ou seja, o cálculo de valores particulares é realizado pelo segmento de programa compreendido entre as linhas 5000 e 5080.

A opção 4 do menu principal, ou seja o memorando auxiliar está compreendido entre as linhas 6000 e 6120.

A formatação dos gráficos é realizado pela sub-rotina compreendida entre as linhas 8000 e 8210, a qual é acessada pelos segmentos de programa que executam o traçado do gráfico das funções.

A movimentação do marcador de coordenadas e a impressão das mesmas é executada pela subrotina compreendida entre as linhas 9000 e 9100, a qual também é acessada pelas sub-rotinas de traçado gráfico.

As funções são definidas na forma Y!=f(X!) nos segmentos de programas compreendidos entre as linhas relacionadas a seguir.

f0 11010 a 11980
f1 12010 a 12980
f2 13010 a 13980
f3 14010 a 14980
f4 15010 a 15980
f5 16010 a 16980
f6 17010 a 17980
f7 18010 a 18980
f8 19010 a 19980
f9 20010 a 20980

Observe-se finalmente que a sub-rotina compreendida entre as linhas 10000 e 20990 possui uma entrada e 10 retornos. A linha 10010 direciona o processamentro para a função em cálculo no momento atual.

LISTAGEM DO PROGRAMA

```
100 REM ********************************
110 REM *                              *
120 REM * PROGRAMA APLICATIVO PARA  A *
130 REM * NALISE GRAFICA DE 10 FUNCOE *
140 REM * S REAIS SIMULTANEAMENTE *** *
150 REM * VERSAO 2.0 MSX NOVEMBRO  87 *
160 REM * RAUL M. P. FRIEDMANN ****** *
180 REM * CURITIBA * PARANA BRASIL ** *
190 REM *                              *
200 REM ********************************
210 MAXFILES=1:DIM X!(240),Y!(9,240),GF$
(9),CF(9):CD=0:SCREEN 0:WIDTH 40:KEYOFF
220 SCREEN 2:FOR I=1 TO 8:READ K$:S$=S$+
CHR$(VAL("&B"+K$)):NEXT I:SPRITE$(0)=S$:
SCREEN 0:WIDTH 40
230 DATA 00010000,00010000,00010000,1111
1110,00010000,00010000,00010000,0000000
240 C1=15:C2=1:C3=1:INPUT"COR DO PRIMEIR
O PLANO (01 A 15) ";C1:PRINT:INPUT"COR D
O FUNDO ******** (01 A 15) ";C2:PRINT:IN
PUT"COR DA BORDA ******** (01 A 15) ";C3
:PRINT:COLOR C1,C2,C3
250 GF$(0)="S":CF(0)=0:FOR I=1 TO 9:GF$(
I)="N":CF(I)=0:NEXT I:ST=1:EX$="LIN":EY$
="LIN":DX$="N":DY$="N":LX$="N":LY$="N":M
$="S":INPUT"PASSO DE CALCULO ***********
*****
           *** ( 1 / 2 / 4 / 8 / 12 / 2
4 ) ";ST
500 REM DEFINICAO DE CONSTANTES E FUNCOE
S
510 PI!=4*ATN(1)
520 E!=EXP(1)
1000 REM INTERVALO DE ANALISE
1010 SCREEN 0:PRINT"xmin - valor inicial
 de  x  para analise"
1020 PRINT"xmax - valor  final  de  x  p
ara analise":PRINT
1030 LOCATE 0,5:INPUT"xmin ";XI!:LOCATE
0,5:PRINT"xmin = ";:PRINT USING"+#.#####
^^^^";XI!:PRINT
1040 LOCATE 0,7:INPUT"xmax ";XA!
1050 IF XA!<=XI! THEN LOCATE 0,10:PRINT"
xmax > xmin ":PRINT:GOTO 1040 ELSE LOCAT
E 0,7:PRINT"xmax = ";:PRINT USING"+#.###
##^^^^";XA!
```

```
1060 LOCATE 0,10:INPUT"escala x linear o
u logaritimica
                              ( lin / LIN / log
 / LOG ) ";EX$:IF EX$<>"lin" AND EX$<>"L
IN" AND EX$<>"log" AND EX$<>"LOG" THEN G
OTO 1060
1070 IF EX$="lin" OR EX$="LIN" THEN FOR
I=0 TO 240 STEP ST:X!(I)=XI!+I*(XA!-XI!)
/240:NEXT I
1080 IF EX$="log" OR EX$="LOG" THEN IF X
I!<=0 THEN LOCATE 0,15:PRINT"xmin ≤ 0
->   escala x linear":GOTO 1060
1090 IF EX$="log" OR EX$="LOG" THEN FOR
I=0 TO 240 STEP ST:LX=LOG(XI!)+I*(LOG(XA
!)-LOG(XI!))/240:X!(I)=EXP(LX):NEXT I
1500 REM MENU PRINCIPAL
1510 SCREEN 0:PRINT"Analise Grafica  de
 Funcoes Reais de
                        uma  Variavel  Indep
endente ........      ":PRINT
1520 PRINT"01 - Funcoes em analise .....
........":PRINT
1530 PRINT"02 - Graficos  das Funcoes em
 analise":PRINT
1540 PRINT"03 - Valores Particulares ...
........":PRINT
1550 PRINT"04 - Memorando auxiliar .....
........":PRINT:PRINT
1560 OP=0:INPUT"Opcao ..................
......... ";OP:IF OP<1 OR OP>4 OR OP-FIX
(OP)<>0 THEN GOTO 1500
1580 ON OP GOTO 2500,3000,5000,6000
2500 REM FUNCOES EM ANALISE
2510 SCREEN 0:PRINT"Funcoes em Analise":
PRINT:PRINT"( s / S / n / N  )":PRINT:PR
INT
2520 FOR I=0 TO 9
2530 LOCATE 0,4+I:PRINT"f";I;"   ";GF$(I)
:LOCATE 4,4+I:INPUT GF$(I):IF GF$(I)<>"s
" AND GF$(I)<>"S" AND GF$(I)<>"n" AND GF
$(I)<>"N" THEN GOTO 2530
2540 NEXT I:GOTO 1500
3000 REM GRAFICOS DAS FUNCOES
3010 K=10:FOR I=0 TO 9
3020 IF K=10 THEN IF GF$(I)="s" OR GF$(I
)="S" THEN K=I
```

```
3030 NEXT I
3040 IF K=10 THEN GOTO 1500
3050 FOR I=K TO 9
3060 IF GF$(I)="n" OR GF$(I)="N" THEN GO
TO 3140 ELSE IF CF(I)=1 THEN GOTO 3140
3070 SCREEN 0:PRINT" Processamento de f"
;I;"          (0 a 240)":PRINT
3080 FOR J=0 TO 240 STEP ST
3090 LOCATE 0,2:PRINT J:X!=X!(J):GOSUB 1
0000:Y!(I,J)=Y!
3100 IF J=0 THEN YN!(I)=Y!:YX!(I)=Y!
3110 IF Y!<YN!(I) THEN YN!(I)=Y!
3120 IF Y!>YX!(I) THEN YX!(I)=Y!
3130 NEXT J:CF(I)=1
3140 NEXT I
3150 SCREEN 0:PRINT"Valores Maximos e Mi
nimos das Funcoes    "
3160 PRINT"          ymin              yma
x     "
3170 J=4:FOR I=K TO 9
3180 IF GF$(I)="s" OR GF$(I)="S" THEN LO
CATE 0,J:PRINT USING"+#.#####^^^^";YN!(I
):LOCATE 18,J:PRINT USING"+#.#####^^^^";
YX!(I):LOCATE 35,J:PRINT I:LOCATE 34,J:P
RINT"f":J=J+1
3190 NEXT I
3200 FOR I=K TO 9
3210 IF I=K THEN YN!=YN!(I):YX!=YX!(I)
3220 IF GF$(I)="s" OR GF$(I)="S" THEN IF
 YN!(I)<YN! THEN YN!=YN!(I)
3230 IF GF$(I)="s" OR GF$(I)="S" THEN IF
 YX!(I)>YX! THEN YX!=YX!(I)
3240 NEXT I
3250 J=J+1:LOCATE 0,J:PRINT USING"+#.###
##^^^^";YN!:LOCATE 18,J:PRINT USING"+#.#
####^^^^";YX!:LOCATE 34,J:PRINT"f *"
3260 J=J+2:LOCATE 0,J+2:PRINT"Referencia
s para  os  graficos"
3270 LOCATE 0,J:INPUT NY!:LOCATE 0,J:PRI
NT USING"+#.#####^^^^";NY!
3280 LOCATE 18,J:INPUT XY!:IF XY!<= NY!
THEN LOCATE 0,J+2:PRINT"nos graficos
  xmax >  xmin":GOTO 3280 ELSE LOCATE 18
,J:PRINT USING"+#.#####^^^^";XY!:LOCATE
34,J:PRINT"g r"
3290 LOCATE 0,J+2:INPUT"Sequencia de pro
```

```
cessamento s/n      ";SP$:IF SP$<>"s" AND
SP$<>"S" AND SP$<>"n" AND SP$<>"N" THEN
GOTO 3290 ELSE IF SP$="n" OR SP$="N" THE
N GOTO 1500
3300 SCREEN 0
3310 LOCATE 0,0:INPUT"escala y linear ou
 logaritmica
                     ( lin / log )
      ";EY$:IF EY$<>"lin" AND EY$<>"LIN
" AND EY$<>"log" AND EY$<>"LOG" THEN GOT
O 3310 ELSE PRINT:PRINT
3320 IF EY$="log" OR EY$="LOG" THEN IF N
Y!<=0 THEN PRINT"ha valor y ≤ 0 -> excal
a y lin":GOTO 3310
3330 IF EY$="lin" OR EY$="LIN" THEN GOTO
 3500 ELSE GOTO 4000
3500 REM TRACADO DO DIAGRAMA ESCY LIN
3510 GOSUB 8000:FOR I=0 TO 9
3520 IF GF$(I)="n" OR GF$(I)="N" THEN GO
TO 3590
3530 FOR J=ST TO 240 STEP ST
3540 IF Y!(I,J-ST)<NY! OR Y!(I,J-ST)>XY!
 OR Y!(I,J)<NY! OR Y!(I,J)>XY! THEN GOTO
 3580
3550 X1=J+8-ST:Y1=168-160*(Y!(I,J-ST)-NY
!)/(XY!-NY!)
3560 X2=J+8:Y2=168-160*(Y!(I,J)-NY!)/(XY
!-NY!)
3570 LINE(X1,Y1)-(X2,Y2)
3580 NEXT J
3590 NEXT I
3600 GOSUB 9000:GOTO 1500
4000 REM TRACADO DO DIAGRAMA ESCY LOG
4010 GOSUB 8000:FOR I=0 TO 9
4020 IF GF$(I)="n" OR GF$(I)="N" THEN GO
TO 4090
4030 FOR J=ST TO 240 STEP ST
4040 IF Y!(I,J-ST)<NY! OR Y!(I,J-ST)>XY!
 OR Y!(I,J)<NY! OR Y!(I,J)>XY! THEN GOTO
 4080
4050 X1=J+8-ST:Y1=168-160*(LOG(Y!(I,J-ST
))-LOG(NY!))/(LOG(XY!)-LOG(NY!))
4060 X2=J+8:Y2=168-160*(LOG(Y!(I,J))-LOG
(NY!))/(LOG(XY!)-LOG(NY!))
4070 LINE(X1,Y1)-(X2,Y2)
4080 NEXT J
```

```
4090 NEXT I
4100 GOSUB 9000:GOTO 1500
5000 REM VALORES PARTICULARES
5010 SCREEN 0:PRINT"Valores Particulares
":PRINT
5020 INPUT"f ";I:PRINT:IF I<0 OR I>9 OR
I-FIX(I)<>0 THEN GOTO 5000
5030 INPUT"x ";X!:PRINT
5040 GOSUB 10000
5050 SCREEN 0:PRINT"f";I;"************":
PRINT
5060 PRINT"x = ";:PRINT USING"+#.#####^^
^^";X!:PRINT
5070 PRINT"y = ";:PRINT USING"+#.#####^^
^^";Y!:PRINT
5080 INPUT"Retorno        <┘ ";RT:GOTO 150
0
6000 REM COMENTARIOS
6010 SCREEN 0:PRINT"Funcoes f0 a f9 defi
nidas como  Y!=f(X!)":PRINT
6020 PRINT"f0 - linhas 11010 a 11990"
6030 PRINT"f1 - linhas 12010 a 12990"
6040 PRINT"f2 - linhas 13010 a 13990"
6050 PRINT"f3 - linhas 14010 a 14990"
6060 PRINT"f4 - linhas 15010 a 15990"
6070 PRINT"f5 - linhas 16010 a 16990"
6080 PRINT"f6 - linhas 17010 a 17990"
6090 PRINT"f7 - linhas 18010 a 18990"
6100 PRINT"f8 - linhas 19010 a 19990"
6110 PRINT"f9 - linhas 20010 a 20990"
6120 PRINT:PRINT:INPUT"Continucao ......
................. <┘ ";RT
6130 SCREEN 1:WIDTH 32
6140 PRINT"Controle de Tela  Grafica":PR
INT:PRINT
6150 PRINT"          retorno
                                   marca
dor     ▲      marcador                ◀
   ▶                para esq      ▼     para
 dir
           proxima"
6160 PRINT:PRINT:INPUT"Menu Principal ..
... <┘ ";RT:GOTO 1500
8000 REM FORMATCAO DOS GRAFICOS
8010 REM DEFINICAO DA FORMATACAO GRAFICA
```

```
8020 SCREEN 0:PRINT"Formatacao  Para  Tr
acado dos Diagramas":PRINT:PRINT
8030 IF EX$="lin"OR EX$="LIN" THEN GOTO
8060 ELSE DX=(LOG(XA!/XI!)/LOG(10)):IF D
X-FIX(DX)=0 THEN PRINT"Ha ";:PRINT USING
"##";DX;:PRINT" decadas no intervalo  [x
min,xmax]":PRINT
8040 INPUT"Divisao horizontal em decadas
 (s/n) ";DX$:IF DX$<>"s" AND DX$<>"S" AN
D DX$<>"n" AND DX$<>"N" THEN GOTO 8040 E
LSE IF DX>=1 AND DX<=3 THEN SX=1 ELSE IF
 DX>=4 AND DX<=9 THEN SX=3 ELSE ELSE SX=
10
8050 IF DX$="s" OR DX$="S" THEN LX$="N":
PRINT:GOTO 8080 ELSE PRINT
8060 INPUT"Divisao horizontal linear
 (s/n) ";LX$:IF LX$<>"s" AND LX$<>"S" AN
D LX$<>"n" AND LX$<>"N" THEN GOTO 8060 E
LSE PRINT
8070 IF LX$="s" OR LX$="S" THEN INPUT"Nu
mero de intervalos      (1 a 30) ";NX:IF
 NX<1 OR NX>30 THEN GOTO 8070 ELSE PRINT

8080 IF EY$="lin" OR EY$="LIN" THEN GOTO
 8110 ELSE DY=(LOG(XY!/NY!)/LOG(10)):IF
DY-FIX(DY)=0 THEN PRINT"Ha ";:PRINT USIN
G"##";DY;:PRINT" decadas no intervalo  [
ymin,ymax]":PRINT
8090 INPUT"Divisao  vertical em decadas
 (s/n) ";DY$:IF DY$<>"s" AND DY$<>"S" AN
D DY$<>"n" AND DY$<>"N" THEN GOTO 8090 E
LSE IF DY>=1 AND DY<=2 THEN SY=1 ELSE IF
 DY>=3 AND DY<=6 THEN SY=3 ELSE SY=10
8100 IF DY$="s" OR DY$="S" THEN LY$="N":
PRINT:GOTO 8130 ELSE PRINT
8110 INPUT"Divisao  vertical linear
 (s/n) ";LY$:IF LY$<>"s" AND LY$<>"S" AN
D LY$<>"n" AND LY$<>"N" THEN GOTO 8110 E
LSE PRINT
8120 IF LY$="s" OR LY$="S" THEN INPUT"Nu
mero de intervalos      (1 a 20) ";NY:IF
 NY<1 OR NY>20 THEN GOTO 8120 ELSE PRINT

8130 INPUT"Margeamento
 (s/n) ";M$:IF M$<>"s" AND M$<>"S" AND M
$<>"n" AND M$<>"N" THEN GOTO 8130 ELSE P
```

```
RINT
8140 INPUT"Confirmacao de especificacoes
 (s/n) ";C$:IF C$<>"s" AND C$<>"S" AND C
$<>"n" AND C$<>"N" THEN GOTO 8150 ELSE I
F C$="n" OR C$="N" THEN GOTO 8000
8150 SCREEN 2
8160 IF M$="s" OR M$="S" THEN FOR I=8 TO
 248 STEP 2:PSET(I,8):PSET(I,168):NEXT I
:FOR I=8 TO 168 STEP 2:PSET(8,I):PSET(24
8,I):NEXT I:LINE(4,4)-(252,172),,B
8170 IF LY$="s" OR LY$="S" THEN FOR I=8
TO 248 STEP 2:FOR J=8 TO 168 STEP 160/NY
:PSET(I,J):NEXT J:NEXT I
8180 IF DY$="s" OR DY$="S" THEN FOR I=0
TO DY-1:FOR J=1 TO 10 STEP SY:YY=168-I*1
60/DY-160*LOG(J)/(LOG(10)*DY):FOR K=8 TO
 248 STEP 2:PSET(K,YY):NEXT K:NEXT J:NEX
T I
8190 IF LX$="s" OR LX$="S" THEN FOR I=8
TO 168 STEP 2:FOR J=8 TO 248 STEP 240/NX
:PSET(J,I):NEXT J:NEXT I
8200 IF DX$="s" OR DX$="S" THEN FOR I=0
TO DX-1:FOR J=1 TO 10 STEP SX:XX=I*240/D
X+240*LOG(J)/(LOG(10)*DX):FOR K=8 TO 168
 STEP 2:PSET(8+XX,K):NEXT K:NEXT J:NEXT
I
8210 RETURN
9000 REM SUBROTINA DO CURSOR GRAFICO
9010 OPEN"GRP:" FOR OUTPUT AS #1:CX=120
9020 CG=STICK(0)
9030 IF CG=0 THEN GOTO 9020
9040 IF CG=1 THEN CLOSE#1:RETURN
9050 IF CG=3 THEN IF CX<240 THEN CX=CX+S
T ELSE CX=0
9060 IF CG=5 THEN IF GR=9 THEN GR=0 ELSE
 GR=GR+1
9065 IF GF$(GR)="n" OR GF$(GR)="N" THEN
GOTO 9060
9070 IF CG=7 THEN IF CX>0 THEN CX=CX-ST
ELSE CX=240
9080 IF EY$="lin" OR EY$="LIN" THEN Y=16
8-160*(Y!(GR,CX)-NY!)/(XY!-NY!):IF Y>=8
AND Y<=168 THEN PUT SPRITE 0,(CX+8-3,Y-4
),C1,0 ELSE GOTO 9020
9090 IF EY$="log" OR EY$="LOG" THEN Y=16
8-160*(LOG(Y!(GR,CX))-LOG(NY!))/(LOG(XY!
```

```
)-LOG(NY!)):IF Y>=8 AND Y<=168 THEN PUT
SPRITE 0,(CX+8-3,Y-4),C1,0 ELSE GOTO 902
0
9100 LINE(0,180)-(255,188),C2,BF:PRESET(
0,180):PRINT#1,"x=":PRESET(16,180):PRINT
#1,USING"+#.#####^^^^";X!(CX):PRESET(120
,180):PRINT#1,"f":PRESET(120,180):PRINT#
1,GR
9110 PRESET(144,180):PRINT#1,"y=":PRESET
(160,180):PRINT#1,USING"+#.#####^^^^";Y!
(GR,CX):GOTO 9020
10000 REM ENDERACAMENTO DAS FUNCAO EM PR
OCESSAMENTO
10010 ON I+1 GOTO 11000,12000,13000,1400
0,15000,16000,17000,18000,19000,20000
11000 REM F0 (11010 A 11980)
11010 Y!=X!
11990 RETURN
12000 REM F1 (12010 A 12980)
12010 Y!=X!^2
12990 RETURN
13000 REM F2 (13010 A 13980)
13010 IF X!<0 THEN Y!=0 ELSE Y!=SQR(X!)
13990 RETURN
14000 REM F3 (14010 A 14980)
14010 Y!=10^X!
14090 RETURN
15000 REM F4 (15020 A 15980)
15010 IF X!<=0 THEN Y!=0 ELSE Y!=LOG(X!)
/LOG(10)
15990 RETURN
16000 REM F5 (16010 A 16980)
16010 Y!=SIN(X!)
16990 RETURN
17000 REM F6 (17010 A 17980)
17010 Y!=COS(X!)
17990 RETURN
18000 REM F7 (18010 A 18980)
18010 Y!=X!*SIN(X!)
18990 RETURN
19000 REM F8 (19010 A 19980)
19010 IF X!=0 THEN Y!=1 ELSE Y!=SIN(X!)/
X!
19990 RETURN
20000 REM F9 (20010 A 20980)
20010 Y!=ABS(SIN(X!))
20990 RETURN
```

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

01 - Representar graficamente a potência instantânea em função do tempo para um circuito no qual é aplicada um tensão v = 5.cos(w.t) e desenvolve-se uma corrente i = 2.cos(w.t). Determinar os gráficos da tensão, corrente e potência instantânea em função do tempo para um um período da tensão aplicada.

O equacionamento dos valores da tensão, corrente e potência resulta em

v = 5.cos(w.t)
p = 2.cos(w.t)
p = v.i = 5.cos(w.t).2.cos(w.t)

Definindo-se estas três equações nos segmentos de programa reservados a f0, f1 e f2 tem-se

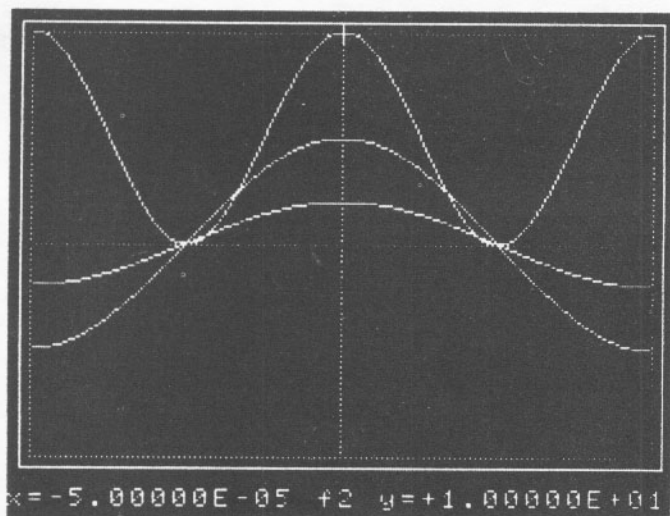
```
11010 Y!=5*COS(X!)
12010 Y!=2*COS(X!)
13010 Y!=10*COS(X!)^2
```

Observe-se que a potência instantânea possui no segmento inicial do programa e que a unidade angular em que opera o BASIC é radianos. Analisando-se a função para o intervalo [-3,14159 , +3,14159] rad/s , especificando-se o intervalo de representação de y como [-10 , +10] e a formatação do gráfico com a divisão em dois intervalos horizontais e dois intervalos verticais e incluindo-se margeamento tem-se o gráfico apresentado na figura 2.1.

Observe-se que a potência instântenea possui uma frequência duas vezes maior que a frequência da tensão e corrente correspondentes, que neste caso a potência será sempre positiva e que a potência média é metade da potência de pico.

02 - Representar graficamente em função da frequência, no intervalo de [0 , 4000] rad/s, o comportamento da resistência, reatância indutiva e impedância de um circuito RL série composto por uma resistência de 100 ohms e uma indutância de 0,1 H.

A impedância do circuito é dada por

Figura 2.1 - v = f(t)   i = f(t)   p = f(t) Problema 01 .

$Z = R + j.XL$ $\qquad$ $XL = w.L$

que sob forma real pode ser expressa por

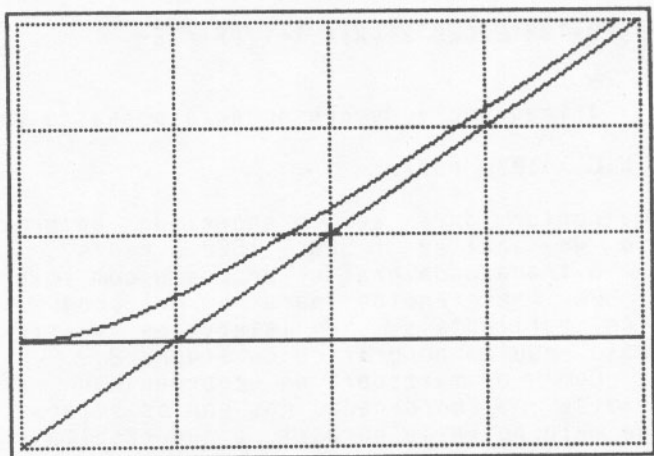
$$Z = R^2 + (w.L)^2$$

A definição das equações correspondentes a resistência, reatância indutiva e impedância nos segmentos de programa reservados a f0, f1 e f2 pode ser feita por

```
11010 Y!=100
12010 Y!=X!*.1
13010 Y!=SQR(100^2+(X!*.1)^2)
```

Definindo-se o intervalo [ymin , ymax] como [0 , 400] e formatando-se o gráfico com 4 intervalos horizontais e 4 verticais tem-se o gráfico apresentado na figura 2.2.

Para valores reduzidos de w, Z aproxima-se do valor da resistência, uma vez que R>>XL.Para valores elevados de w, Z aproxima-se de XL, uma vez que XL>>R.

Figura 2.2 - R = f(w)   XL = f(w)   Z = f(w) Problema 2.

03 - Representar graficamente em função da frequência, para o intervalo de 0,5.wo a 1,5.wo, o comportamento da potência média desenvolvida sobre um circuito RLC série no qual R = 20 ohms, L = 0,1 H e C = 10 uF. O circuito é alimentado por uma fonte de tensão alternada de forma de onda sinusoidal de valor eficaz 100 V rms. Com o auxílio de marcador de coordenadas determinar os pontos de meia potência e comparar a faixa de passagem com o valor obtido analiticamente.

A corrente sobre o resistor é descrita por

$$IR = V / (R+j.(XL-XC)) = V / (R+j.(w.L-1/(w.C)))$$

A potência média desenvolvida sobre o resistor coincide com a potência absorvida pelo circuito, uma vez que as contribuições do indutor e do capacitor são reativas e possuem valor médio nulo. Assim sendo a potência pode ser expressa (como uma função real) por

$$P = R.I^2 = R.V^2/(R^2+(w.L-1/(w.C))^2)$$

que pode ser definida no programa no segmento reservado a função f0 por

```
11010 Y!=20*100^2/(20^2+(X!*.1-1/(X!*1E-05))^2)
```

A frequência de ressonância possui o valor de

wo = 1/ L.C = 1000 rad/s

o que em conformidade com o enunciado determina o intervalo de análise [500 , 1500] rad/s.

O traçado do gráfico proposto com ymin = 0 e ymax = 500 (referências para o gráfico), com 5 intervalos horizontais, 2 intervalos verticais e margeamento resulta no gráfico da figura 2.3.

Com o marcador de coordenadas ativados determinam-se as coordenadas dos pontos adjacentes aos pontos de meia potência para w1, o que resulta em

x = 904,167	x = ???????	x = 908,333
y = 247,731	y = 250,000	y = 259,441

que através de interpolação fornecem

x = 904,176 + (250,000-247,731) . (908,333-904,167) / (259,441-247,731)

w1 = 904,974 rad/s

Procedendo-se de modo semelhante para w2 obtem-se

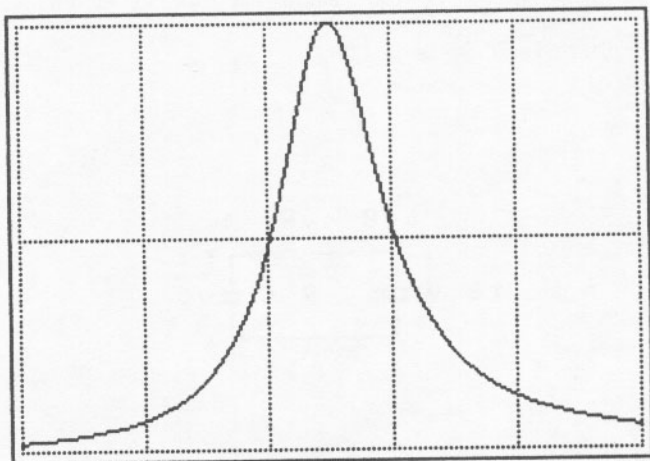
x = 1104,17	x = ???????	x = 1108,33
y = 251,866	y = 250,000	y = 242,526

w2 = 1105,00 rad/s

Observe-se que a média geométrica destes dois valores devem resultar em w0. Calculando-se a média geométrica destes dois valores tem-se

w1.w2 = 999,998 = 1000 rad/s

o que confirma a validade dos resultados.

Figura 2.3 - P = f(w)   Problema 3.

A faixa de passagem é determinada por

BW = 1105,00 - 904,974 = 200,026 rad/s

Analiticamente este valor deveria fornecer

BW = w0/Q0 = w0/(XL0/R) = 200 rad/s

O erro relativo obtido pela análise efetuada é, para BW, de

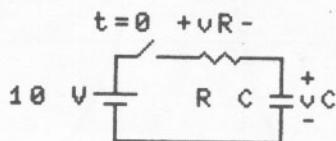
(206,026-200,000)/200,000 = 0,00013 = 0,013 por cento

o que confirma novamentes os resultados obtidos.

SUGESTÃO - Analisar o gráfico da função para os intervalos [904,167 , 908,333] e [1104,17 , 1108,33] a fim de comprovar a validade desta interpolação.

04 - Representar graficamente as tensões no resistor e no capacitor do circuito da figura 2.4 como uma função do tempo para o intervalo de tempo delimitado pelos

instantes t = 0 e t = 5 s. O capacitor possui carga nula em t = 0. Determinar com o auxílio do marcador de coordenadas o instante de tempo em que vC = vR.

Figura 2.4 - Circuito RC Serie

As equações que descrevem o comportamento de vC e vR no circuito são

$$vC = V.(1-e^{-t/(R.C)}) \qquad vR = V.e^{-t/(R.C)} \qquad t > 0$$

que para os valores estipulados podem ser definidas no programa nos segmentos reservados a f0 e f1 como

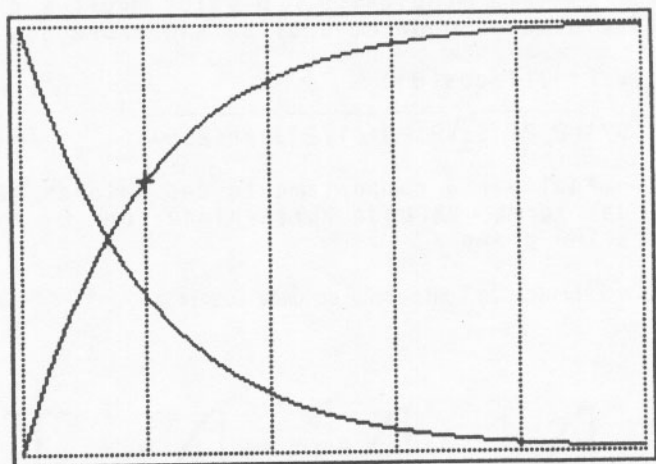
```
11010 Y!=10*(1-EXP(-X!))
12010 Y!=10*EXP(-X!)
```

Formatando-se o gráfico com ymin = 0 , ymax = 10 , 5 intervalos horizontais e margeamento obtem-se o gráfico apresentado na figura 2.5.

A condição de igualdade apresentada implica em vC = vR = 5 V. O deslocamento do marcador de coordenadas sobre o gráfico de vC (f0) resulta que o ponto correspondente a vC = 5 V localiza-se entre os pontos de coordenadas

x = 0,687500	x = ???????	x = 0,70833
y = 4,97168	y = 5.00000	y = 5.07536

que por interpolação fornecem t = 0,693190.

Figura 2.5 - vC = f(t) vR = f(t) Problema 4.

x=+1.00000E+00 f0 y=+6.32121E+00

Verificando-se o valor de vC (f0) para o valor de t obtido por interpolação obtem-se vC = 5,00021.

A determinação do valor de t em que vC (f0) igualar 5 V pode ser realizada por testes para sucessivos valores particulares. Deste modo obtem-se uma solução mais exata. No caso verifica-se que para o instante de tempo t = 0,693150 obtem-se vC = 5,00000.

O erro relativo devido a interpolação pode então ser calculaco como

(0,693190-0,693150)/0,693150 = 0,0000577076

= 0,00577076 por cento

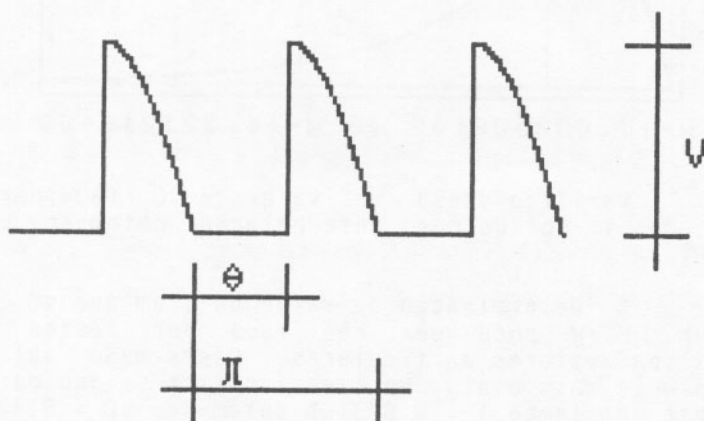
Observe-se que cada intervalo horizontal do gráfico correponde a uma constante de tempo e que decorrida 1 constante de tempo (no caso o produto R.C = 1) a tensão no capacitor é igual a 0,632121.V. O capacitor pode ser considerado completamente carregado com a tensão da fonte após 5 constantes de tempo.

05 - A forma-de-onda apresentada na figura 2.6 caracteriza a retificação controlada de onda completa para um sistema monofásico. O valor médio e o valor eficaz da forma-de-onda em análise são expressos por

$$Ymed = (V/PI).(1+\cos(\theta))$$

$$Yrms = (V/\sqrt{(2.PI)}).\sqrt{PI-\theta+(1/2).sen(2.\theta)}$$

Analisar o comportamento dos valores médio e eficaz da forma de onda apresentada com θ variando entre 0 e 180 graus.

Figura 2.6 - Retificação Controlada de Onda Completa

Os valores máximos ocorrem para $\theta = 0$ e são

$Ymedmax = V.2/PI$ $\qquad$ $Yrmsmax = V/\sqrt{2}$

Para generalização dos resultados utilizar-se-á o recurso de normalização das funções apresentadas em relação à seus valores máximos, de modo que a variável dependente esteja sempre situada no intervalo [0 , 1]. Deste modo

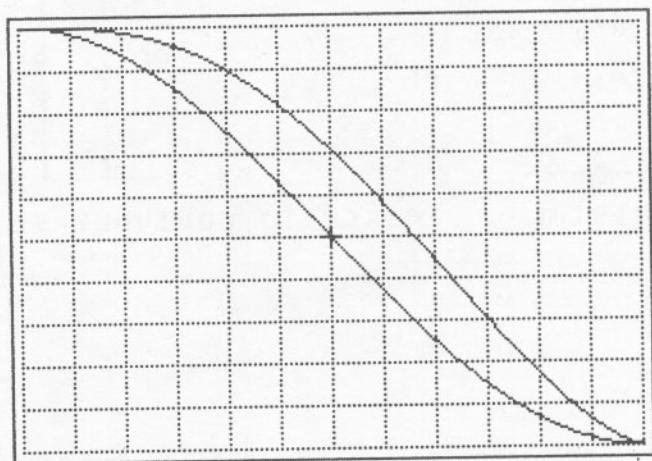
$$Ymed/Ymedmax = (1+\cos(\theta))/2$$

$$Yrms/Yrmsmax = \sqrt{PI-\theta+(1/2).sen(2.\theta)} / \sqrt{PI}$$

Defenindo-se estas funções nos segmentos do programa reservados a f0 e a f1 tem-se

```
11010 XX!=X!*PI!/180
11020 Y!=(1+COS(XX!))/2
12010 XX!=X!*PI!/180
12020 Y!=SQR(PI!-XX!+.5*SIN(2*XX!))/SQR(
PI!)
```

onde a variável XX! corresponde ao valor em radianos de X! que foi especificada em graus. A transformação é necessária devido ao fato de as expressões utilizadas e o BASIC trabalhar com a unidade angular radianos (rad).

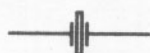
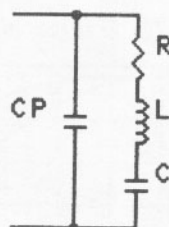
Figura 2.7 - Gráfico do Problema 5

Especificando-se os intervalos da escala x como [0 , 180] e da escala y como [0 , 1], 12 intervalos horizontais, 10 intervalos verticais e margeamento obtem-se o gráfico apresentado, no qual a curva inferior representa o valor médio normalizado e a curva superior representa o valor eficaz normalizado.Cada intervalo horizontal corresponde então a 15 graus (180/12) e cada intervalo vertical a 0,1 (1/10).

06 - Analisar a impedância do cristal de quartzo proposto em função da frequência (em Hz) a partir do seu circuito equivalente.

As frequências de ressonância série e paralela do cristal são expressas por

$$fs = 1/(2.PI.\sqrt{L.C}) \qquad fp = 1/(2.PI.\sqrt{L.C.CP/(C+CP)})$$

Figura 2.8 - Cristal de Quartzo e Circuito Equivalente

R = 1 kΩ
L = 11.804 H
C = 10.438 fF
CP= 4.3 pF

CRISTAL

CIRCUITO EQUIVALENTE

Analisando-se a impedância do cristal a partir da frequência complexa s tem-se

$$Z(s) = \frac{1}{s.CP} \ // \ \left(R + s.L + \frac{1}{s.C} \right)$$

$$Z(s) = \frac{1}{s.CP} \ // \ \frac{s.R.C + s.s.L.C + 1}{s.C}$$

$$Z(s) = \frac{\dfrac{s.s.L.C + s.R.C + 1}{s.CP.s.C}}{\dfrac{C + CP.(s.R.C + s.s.R.C.CP + C + CP)}{s.CP.C}}$$

$$Z(s) = \frac{s^2.L.C + s.R.C + 1}{s^3.L.C.CP + s^2.R.C.CP + s.(C + CP)}$$

que para s = j.w pode ser expressa como

$$Z(j.w) = \frac{(1 - w^2.L.C) + j.(w.R.C)}{(-w^2.R.C.CP + j.(-w^3.L.C.CP + w.(C + CP))}$$

A expressão acima corresponde à razão de dois números complexos

$Z(j.w) = (a + j.b) / (c + j.d)$

cujo módulo é expresso por

$$\sqrt{(a^2 + b^2) / (c^2 + d^2)}$$

e o argumento por

$arc\ tg\ ((-a.d + b.d)/(a.c + b.d))$

O processamento do valor de módulo da impedância será executado no segmento de programa reservado a f0 e o processamento do argumento no segmento de programa reservado a f1 do seguinte modo

```
530 R!=1000
540 L!=11.804
550 C!=1.0438E-14
560 CP!=4.3E-12
```

```
11010 W!=2*PI!*X!
11020 AA!=1-W!^2*L!*C!
11030 BB!=W!*R!*C!
11040 CC!=-W!^2*R!*C!*CP!
11050 DD!=-W!^3*L!*C!*CP!+W!*(C!+CP!)
11060 Y!=SQR((AA!^2+BB!^2)/(CC!^2+DD!^2)
)

12010 W!=2*PI!*X!
12020 AA!=1-W!^2*L!*C!
12030 BB!=W!*R!*C!
12040 CC!=-W!^2*R!*C!*CP!
12040 DD!=-W!^3*L!*C!*CP!+W!*(C!+CP!)
12060 Y!=ATN((-AA!*DD!+BB!*CC!)/(AA!*CC!
+BB!*DD!))*180/PI!
```

Os valores dos componentes obtidos para o circuito equivalente são definidos no segmento inicial do programa de modo a facilitar a definição das fórmulas que descrevem o comportamento do módulo e do argumento da impedância do cristal. A frequência angular w é obtida a partir de f pelos mesmos motivos. A multiplicação por 180 seguida da divisão por PI na linhas 12060 transforma a unidade do argumento de radianos para graus.

O cálculo das frequências de ressonância série e paralela do cristal resulta em

fs = 453416 Hz   fp = 453966 Hz

fp - fs = 453966 - 435416 = 550 Hz

O módulo (f0) e o argumento (f1) da impedância do cristal para as frequências de ressonância série e paralela resultam em (cálculo realizado através da opção de valores particulares)

fs   Z = 1011,57 ohms   θ = -10,1310 graus

fp   Z = 6,62927 Mohms   θ = 2,95172 graus

A impedância do cristal é mínima na frequência de ressonância série é máxima na paralela. O cristal comporta-se como um circuito RC para f<fs e f>fp e como RL para fs<f<fp. Exceto muito próximo a fs e fp o comportamento pode ser considerado puramente

Figura 2.9 - Impedância do Cristal de Quartzo

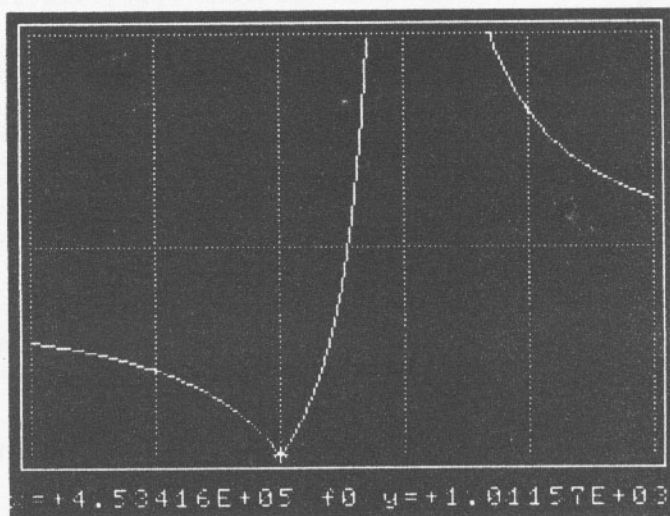
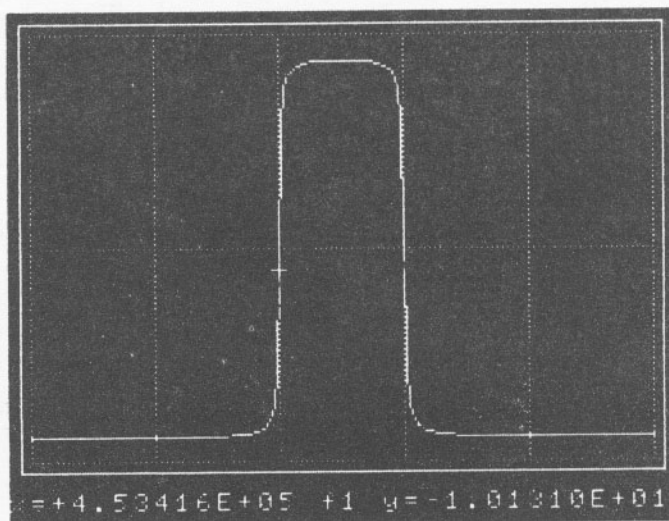
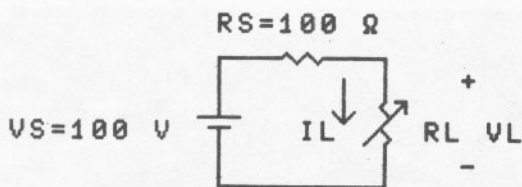



Figura 2.10 - Argumento da Impedância do Cristal de Quartzo.

reativo.

O intervalo de análise será especificado como [fs-2.(fp-fs) , fp+2.(fp-fs)], o que resulta em um intervalo de largura 5.(fp-fs). O cálculo dos valores que definem este intervalo e sua inserção no programa resultam no intervalo [452316 , 455066].

Definindo-se o intervalo de representação do gráfico da impedância (f0) como [0 , 200000], escalas x e y lineares e definido-se o intervalo de representação do argumento (f1) como [-100 , +100] e formatando-se os gráficos apenas com margeamento obtem-se os gráficos apresentados nas figuras 2.9 e 2.10, respectivamente.

OBSERVAÇÃO - Os cristais costumam substituir uma das tres impedâncias de um oscilador a tres impedâncias. Normalmente o cristal atua como um indutor o que implica em apenas uma frequência de oscilação possível, enquanto que a atuação como capacitor implica em duas frequências de oscilação possíveis (isto para osciladores senoidais).

Figura 2.11 - Problema 7

07 - Representar graficamente a tensão, corrente e potência desenvolvidas na carga para o circuito proposto na figura 2.11 com RL variando de 0 a 1000 ohms. Normalizar cada parâmetro em função dos seus valores máximos.

A tensão, corrente e potência na carga são expressas por

$VL = VS.RL/(RS+RL)$ $IL = VS/(RS+RL)$

$PL = VL.IL = VS^2.RL/(RS+RL)^2$

cujos valores máximos são

$VLmax = VS$ $ILmax = VS/RS$ $PLmax = VS^2/(4.RL)$

A normalização dos valores da tensão, corrente e potência na carga resulta então em

$VL/VLmax = RL/(RS+RL)$ $IL/ILmax = RS/(RS+RL)$

$PL/PLmax = 4.RS.RL/(RS+RL)^2$

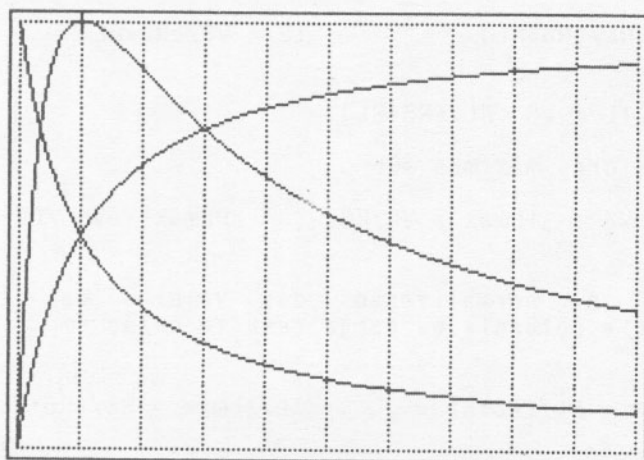
que para os valores do circuito proposto podem ser definidos nos segmentos reservados a f0, f1 e f2 por

```
11010 Y!=X!/(100+X!)
12010 Y!=100/(100+X!)
13010 Y!=4*100*X!/(100+X!)^2
```

A definição do intervalo x como [0 , 1000], o intervalo de representação de y como [0 , 1], a divisão do gráfico em 10 intervalos e a inclusão do margeamento, resultam nos gráficos apresentados na figura 2.12 .

A corrente possui valor máximo quando RL = 0. A medida que RL aumenta a tensão na carga se aproxima da tensão VS. A potência na carga possui o seu valor máximo quando RL = RS (no caso 100 ohms).

OBSERVAÇÃO - Este exercício está relacionado com o teorema da máxima transferência de potência. Outras possibilidades de análise são a representação da tensão, corrente e potência pelos seus valores numéricos ou ainda a normalização da resistência de carga em função da resistência da fonte (RL/RS).

Figura 2.12 - VL = f(T) IL = f(t) PL = f(t) Problema 7.

08 - Representar graficamente as equações dos sinais modulados apresentados.

e0(t) = 10.cos(5.w.t) + 4.cos(4.w.t) + 4.cos(6.w.t)

e1(t) = 4.cos(4.w.t) + 4.cos(6.w.t)

e2(t) = 4.cos(4.w.t)

e3(t) = 4.cos(6.w.t)

e4(t) = 10.cos(5.w.t) + 4.cos(4.w.t)

e5(t) = 10.cos(5.w.t) + 4.cos(6.w.t)

Estes sinais correspondem a uma portadora cossenoidal de amplitude 10 e frequência 5 rad/s modulada por um sinal cossenoidal de frequência 1 rad/s com um índice de modulação de 0,8 através dos seguintes processos:

Figura 2.13 - Onda Modulada em AM-DSB - Problema 08

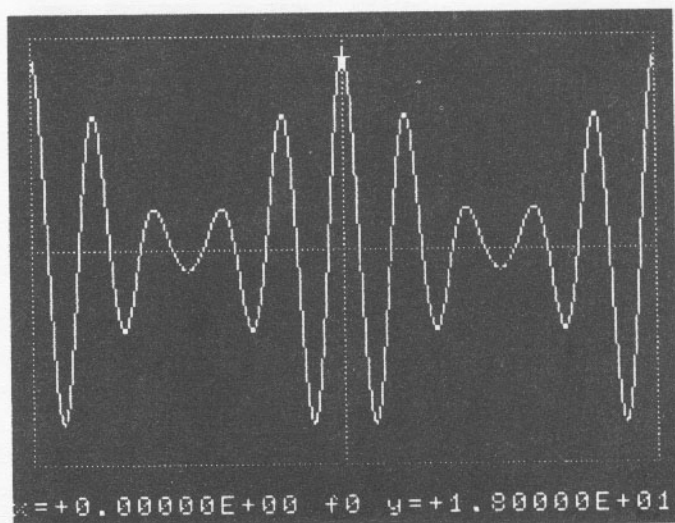



Figura 2.14 Onda Modulada em AM-DSB/SC - Problema 08

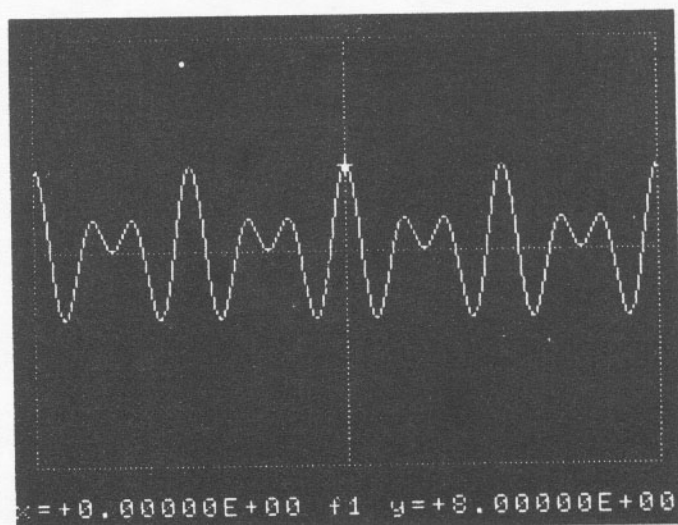



Figura 2.15 Onda Modulada em AM-SSB (UB) - Problema 08

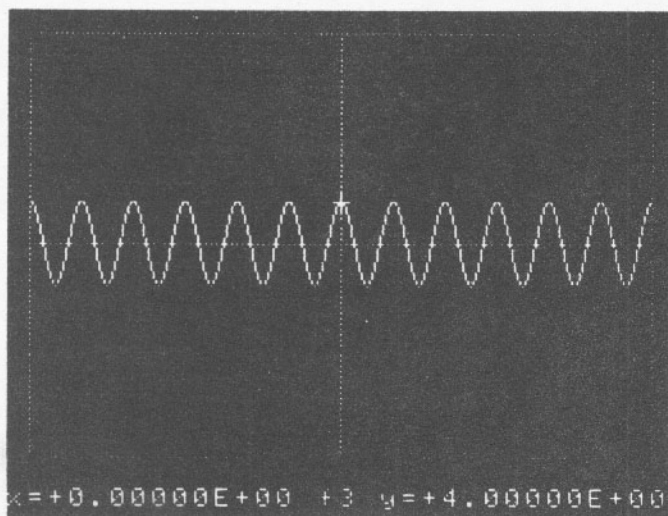
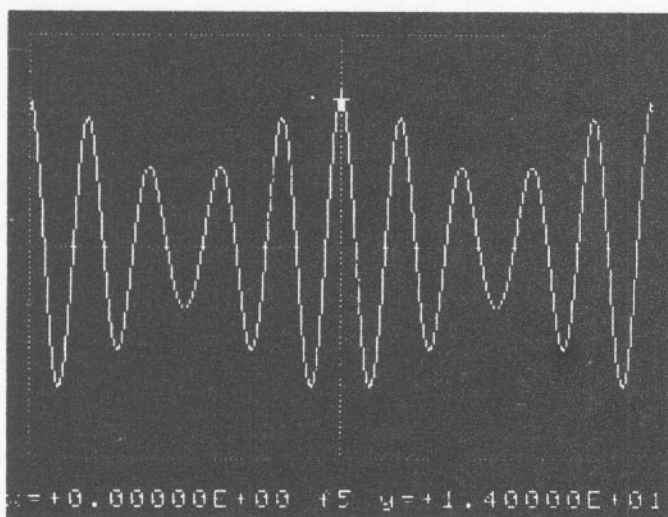



Figura 2.16 Onda Modulada em AM-CSSB (UB) - Problema 08

e0(t) AM-DSB e1(t) AM-DSB/SC

e2(t) AM-SSB (LB) e3(t) AM-SSB (UB)

e4(t) AM-CSSB (LB) e5(t) AM-CSSB (UB)

Representando-se estas ondas nos segmentos de programa reservados a f0 a f5 tem-se

```
11010 Y!=10*COS(5*X!)+4*COS(4*X!)+4*COS(
6*X!)
12010 Y!=4*COS(4*X!)+4*COS(6*X!)
13010 Y!=4*COS(4*X!)
14010 Y!=4*COS(6*X!)
15010 Y!=10*COS(5*X!)+4*COS(4*X!)
16010 Y!=10*COS(5*X!)+4*COS(6*X!)
```

O traçado destas funções será efetuado para dois períodos do sinal modulante, ou seja, para o intervalo [-6,28319 , +6,28319]. Definindo-se o intervalo de representação para a escala y como [-20 , +20] e formatando-se o gráfico com 2 intervalos horizontais e 2 intervalos verticais tem-se os gráficos apresentados nas figuras 2.13, 2.14, 2.15 e 2.16.

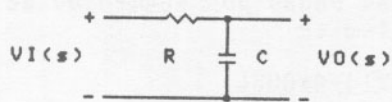
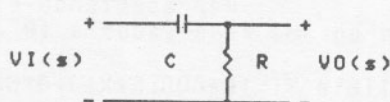
OBSERVAÇÃO - Para maiores detalhes sobre modulação em amplitude verificar o capítulo correspondente ao tema no livro TELECOMUNICAÇÕES - Alcides Tadeu Gomes - Livros Érica Editora Ltda.

09 - Representar graficamente, em função da frequência, os ganhos dos filtros passa-baixa e passa-alta representados na figura 2.17, para o intervalo [0,01.wo , 100.wo], usando escala logarítimica para a variável independente (w) e escala linear para a variável dependente (Av).

O ganho do filtro passa-baixa pode ser expresso por

Av(s) = vo(s)/vi(s) = (1/(s.C))/(R+1/(s.C))

Av(s) = 1/(1+s.R.C)

Figura 2.17 - Filtro Passa-Baixa   Filtro Passa-Alta

que para s = j.w pode ser expresso por

Av(j.w) = 1/(1+j.w.R.C)

Uma vez que não foram especificados os valores de R e C a análise sera efetuada em função da frequência normalizada em relação a frequência de corte do filtro. Deste modo

Av(j.w) = 1/(1+j.(w/wo))   wo = 1/(R.C)

O módulo da Av pode então ser expresso por

$$Av = \sqrt{1^2/(1^2+(w/wo)^2)}$$

Procedendo de modo semelhante para o filtro passa-alta obtém-se

Av(j.w) = j.(w/wo)/(1+j.(w.wo))   wo = 1/(R.C)

$$Av = \sqrt{(w/wo)^2/(1^2+(w/wo)^2)}$$

Definindo-se a equação do módulo do ganho do filtro passa-baixa no segmento de programa reservado a f0 e do filtro passa-alta em f1 como

Figura 2.18 Ganho do Filtro Passa-Baixa - Problema 09

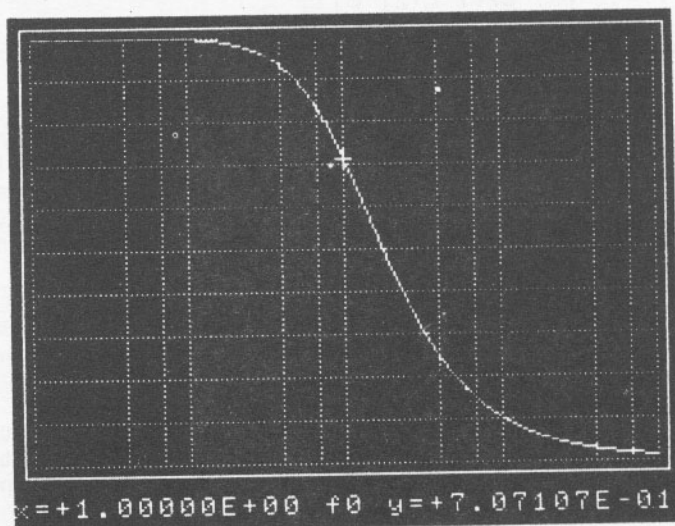
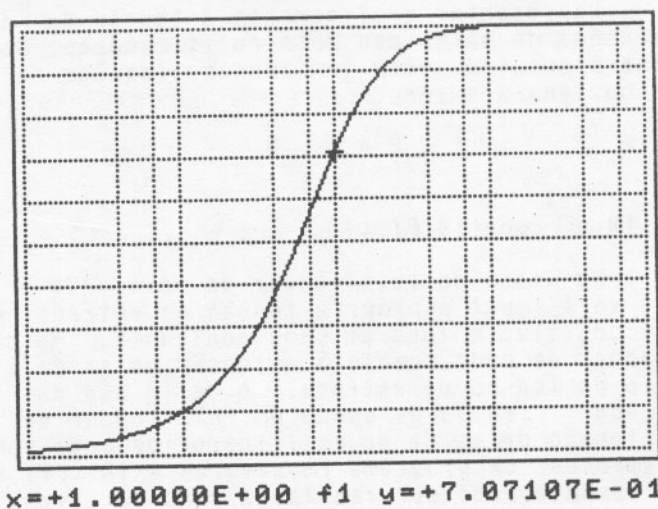



Figura 2.19 - Ganho do Filtro Passa-Alta - Problema 09

```
11010 Y!=SQR(1^2/(1^2+X!^2))
12010 Y!=SQR(X!^2/(1^2+X!^2))
```

e especificando-se os intervalos de representação da escala x como [0,01 , 100] e da escala y como [0 , 1] o programa indicara a existência de 4 décadas no intervalo de análise da variável independente (x) e perguntará se é desejada a divisão horizontal em décadas. Respondendo-se afirmativamente (s) a esta pergunta e especificando-se 10 divisões verticais lineares obtém-se os gráficos apresentados nas figuras 2.18 e 2.19.

A utilização do marcador de coordenadas permite a verificação de que em (w/wo) = 1 (w = wo) o ganho do filtro e 0,707107.Avmax (Avmax/sqr(2)).

SUGESTÃO - Comparar os resultados do problema 09 com os obtidos no problema 14 e com os resultados obtidos através da análise dos diagramas de Bode (ver capítulo correspondente neste livro).

10 - Uma tensão vi(t) descrita pela equação abaixo (oscilação amortecida) é injetada simultaneamente nas entradas de um retificador de meia-onda e de um retificador de onda completa (ambos ideais).

Representar graficamente a tensão de entrada e as tensões de saída dos dois retificadores. Os retificadores propostos permitem apenas tensões de saída maiores ou iguais a zero.

$vi(t) = 0 \qquad t < 0 \text{ e } t = 0$

$vi(t) = 10.e^{-t}.sen(10.PI.t)$

No caso do retificador de meia onda a tensão de saída será igual a própria tensão de entrada quando esta for positiva e zero em caso contrário. No caso do retificador de onda completa a tensão de saída é igual ao módulo da tensão de entrada. A definição da tensão de entrada, tensão de saída do retificador de meia-onda e tensão de saída do retificador de onda completa nos segmentos de programa reservados a f0, f1 e f2, respectivamente pode ser realizada como se segue.

Figura 2.20 - Oscilação Amortecida - Problema 10

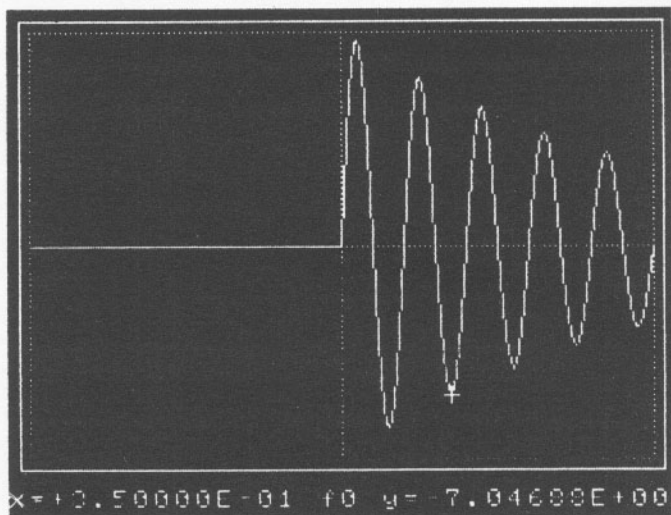



Figura 2.21 - Retificação em Meia-Onda - Problema 10

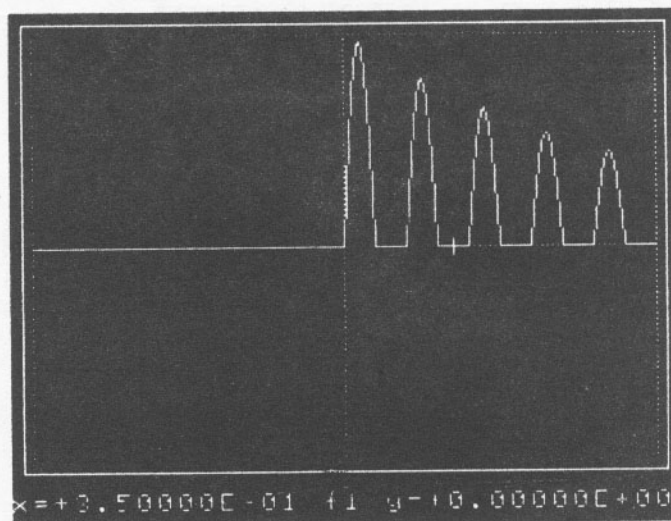
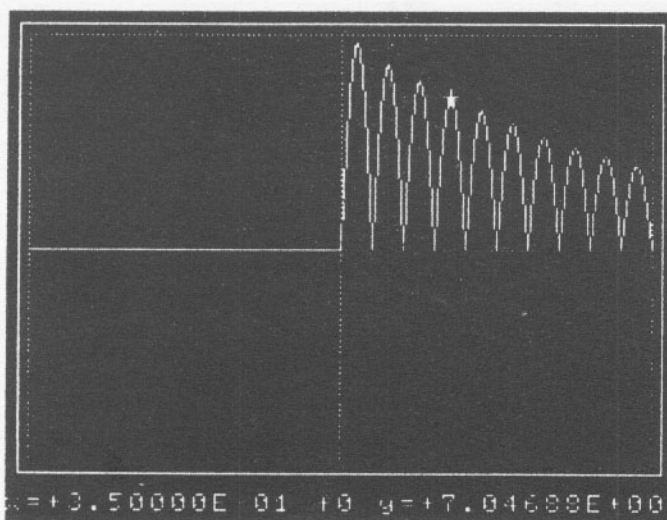



Figura 2.22 - Retifição em Onda Completa - Problema 10

```
11010 IF X!>0 THEN Y!=10*EXP(-X!)*SIN(10
*PI!*X!) ELSE Y!=0

12010 IF X!>0 THEN Y!=10*EXP(-X!)*SIN(10
*PI!*X!) ELSE Y!=0
12020 IF Y!>0 THEN Y!=Y! ELSE Y!=0

13010 IF X!>0 THEN Y!=10*EXP(-X!)*SIN(10
*PI!*X!) ELSE Y!=0
13020 Y!=ABS(Y!)
```

Analisando-se estas funções para o intervalo de variável independente [-3,14159 , +3,14159] e intervalo de variável dependente [-10 , +10] , 2 intervalos horizontais e 2 intervalos verticais, com margeamento obtem-se os gráficos apresentados nas figuras 2.20, 2.21 e 2.22.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

11 - Representar graficamente a potência instantânea em função do tempo para um circuito no qual é aplicada um tensão v = 5.cos(w.t) e desenvolve-se uma corrente i = 2.cos(w.t+PI/2). Determinar os gráficos da tensão, corrente e potência instantânea em função do tempo para um período da tensão aplicada. Usar as mesmas especifições do problema 01 e comparar os resultados. Observe-se que a potência média será nula.

12 - Representar graficamente em função da frequência, no intervalo de [0 , 4000] rad/s, o comportamento da resistência, reatância capacitiva e impedância de um circuito RC série composto por uma resistência de 100 ohms e um capacitor de 10 uF. Usar as mesmas especificações do problema 02 e comparar os resultados.

OBSERVAÇÃO - A reatância capacitiva resultará infinita para w = 0. Para contornar este problema pode-se proceder da seguinte maneira na definição da reatância capacitiva e da impedância

```
11010 Y!=100
12010 IF X!=0 THEN Y!=1E+12 ELSE Y!=1/(X
!*1E-05)
13010 IF X!=0 THEN Y!=1E+12 ELSE Y!=SQR(
100^2+(1/(X!*1E-05))^2)
```

A análise estará correta se a reatância capacitiva igualar R para w = 1000 rad/s.

13 - As ondas moduladas descritas no exercício 08 são retificadas em meia-onda. Representar as formas-de-onda resultantes em cada caso e comprovar que as únicas que possuem envoltórias que seguem a forma-de-onda do sinal modulante são as ondas moduladas em AM-DSB e AM-CSSB (LB e UB).

OBSERVAÇÃO - As envoltórias resultantes da modulação em AM-CSSB possuem metade da amplitude da modulação em AM-DSB. Consultar a bibliografia mencionada no exercício 08 para maiores detalhes sobre os diversos tipos de modulação em amplitude (AM).

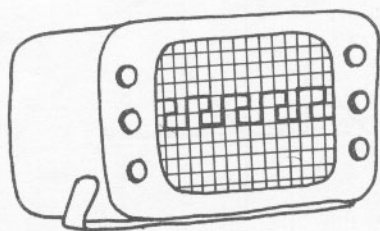
14 - Refazer o problema 09 usando escalas logarítimicas para a variável independente e para a variável dependente. Usar como intervalo de análise na escala x [0,01 , 10] e na escala y [0,01 , 1], solicitando-se a divisão da escalas x e y em décadas.

OBSERVAÇÃO - O acerto das respostas pode ser verificado pela comparação dos valores das coordenadas fornecidas pelo marcador para ambos os casos.

15 - Representar graficamente as funções propostas para o intervalo de tempo da variável independente [-5 , +5] usando as escalas x e y lineares, 2 intervalos horizontais e 2 intervalos verticais com margeamento.

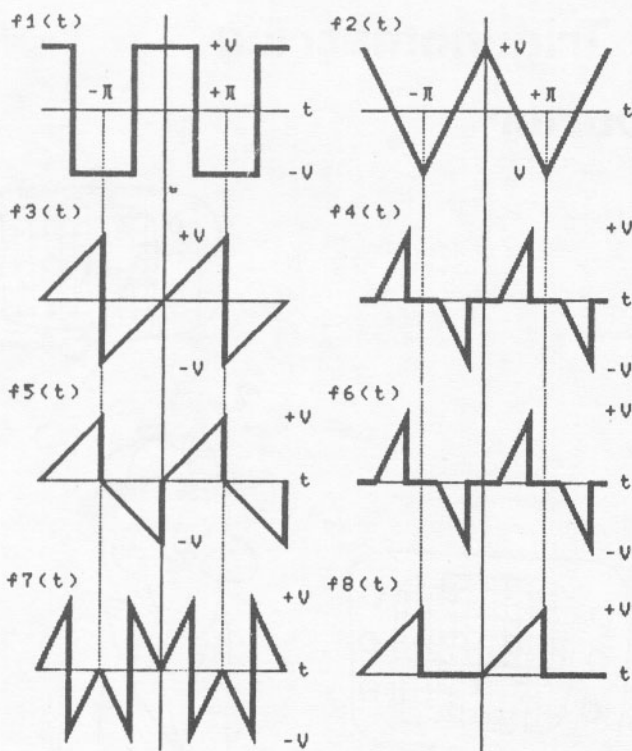
```
11010 Y!=SGN(SGN(X!)+1)                              função u(t)
12010 Y!=SGN(SIN(PI*X!)                                 quadrada
13010 IF X!>0 THEN Y!=FIX(X!) ELSE Y!=0                  escada
14010 IF X!>0 THEN Y!=X!-FIX(X!) ELSE Y! dente-de-serra
=0
```

CAP. 3

Análise Gráfica da Série Trigonométrica de Fourier

SÉRIE TRIGONOMÉTRICA DE FOURIER

RESUMO DA TEORIA

Uma função f(t) é dita periódica se para todo instante de tempo f(t)=f(t+T), sendo t um instante de tempo qualquer e T o periódo da função considerada. As funções representadas Na figurar 3.1 são exemplos de funções periódicas.

Figura 3.1- Exemplos de Funções Periódicas

Análise Gráfica da Série Trigonométrica de Fourier

Se a função f(t) possuir um número finito de descontinuidades ao longo do período T, possuir valor médio finito e possuir um número finito de máximos positivos e negativos, existe a série de Fourier correspondente que pode ser expressa na sua forma trigonométrica como:

$$f(t) = a0 + a1.\cos(1.w.t) + a2.\cos(2.w.t) + \ldots + b2.\text{sen}(1.w.t) + b2.\text{sen}(2.w.t) + \ldots$$

sendo $T=2.\pi/w$. A série também pode ser expressa como:

$$f(t) = a0 + a1.\cos(1.x) + a2.\cos(2.x) + \ldots + b1.\text{sen}(1.x) + b2.\text{sen}(2.t) + \ldots$$

onde $x=w.t$ e $T=2.\pi$.

Os coeficientes a0, an e bn (n=1, 2, 3 ...) sao obtidos por meio de:

$$a0 = w/(2.\pi).\int_0^{2.\pi/w} f(t).dt$$

$$an = w/(2.\pi).\int_0^{2.\pi/w} f(t).\cos(n.w.t).dt$$

$$bn = w/(2.\pi).\int_0^{2.\pi/w} f(t).\text{sen}(n.w.t).dt$$

que também podem ser obtidos por:

$$a0 = 1/(2.\pi).\int_0^{2.\pi} f(x).dx$$

$$an = 1/(2.\pi).\int_0^{2.\pi} f(x).\cos(n.x).dx$$

$$bn = 1/(2.\pi).\int_0^{2.\pi} f(x).\text{sen}(n.x).dx$$

A série converge para o valor de f(t) em todos os pontos, exceto os de descontinuidade. À medida que aumenta o número de harmônicos considerados a série fica mais próxima de f(t). Quanto menor o número de descontinuidades de f(t), mais rápida a convergência de f(t) em função do número de termos considerados.

Observe-se que para funções com formas de onda de valor médio igual a zero o termo a0 se anula.

Para formas de onda com simetria de função par, ou seja, f(t)=f(-t), a série possui apenas termos cossenoidais e o termo de valor médio a0. As funções f1(t) e f2(t) representadas anteriormente são exemplos de funções pares.

Para formas de onda com simetria de função impar, ou seja, f(t)=-f(-t), a série possui apenas termos senoidais. As funções f3(t) e f4(t) representadas anteriormente são exemplos de funções ímpares.

Para formas de onda com simetria de meia-onda, ou seja, f(t)=-f(t+T/2), a série possui apenas termos de ordem impar. As funções f5(t) e f6(t) representadas anteriormente são exemplos de funções com simetria de meia onda.

Cada harmônico contribui para a série com uma amplitude expressa por:

$$c0 = a0 \qquad cn = \sqrt{an^2 + bn^2} \qquad n = 1, 2, 3 \ldots$$

O gráfico das amplitudes em função dos harmônicos considerados é denominado de espectro de linhas, ou ainda, de espectro de raias.

O valor rms (eficaz) da série é expresso por:

$$rms = \sqrt{a0^2 + a1^2/2 + b1^2/2 + a2^2/2 + \ldots}$$

que também pode ser expresso por:

$$Frms = \sqrt{a0^2 + c1^2/2 + c2^2/2 + \ldots}$$

ATUAÇÃO DO PROGRAMA

O programa apresentado, a partir dos

coeficientes a0, an e bn e do número de termos considerado, calcula os valores da série e plota o gráfico da mesma para o intervalo de -180 a +180 graus. A partir deste gráfico base pode-se obter expansões de quadrantes e intervalos, de modo a analisar detalhadamente segmentos de maior interesse.

Adiconalmente testam-se as existências dos diversos tipos de simetria, calculam-se as amplitudes dos diversos termos do espectro de linhas, apresentando-o sob forma tabular e sob forma gráfica. Calculam-se ainda os valores rms (eficazes) da série considerando-se o termo de valor médio (a0) até o enésimo harmônico, de modo a analisar a convergência da série para o valor rms da função por ela representada.

Os coeficientes da série e o número de termos considerado podem ser introduzidos individualmente durante a execução do programa ou definidos em um segmento do programa reservado para tal finalidade. As séries analisadas podem ser salvas em arquivo para posterior reexame. Este recurso é particularmente interessante no arquivamento de séries que não possuam nenhum tipo de simetria e tenha sido calculadas considerando-se um número de termos elevado, o que exige algum tempo de processamento.

ORIENTAÇÕES PARA DIGITAÇÃO

Colocar a tela no modo texto (SCREEN 0) e quarenta colunas (WIDTH 40).

As linhas 1030 a 1100 e 3020 a 3100 são semelhantes, podendo-se usar uma delas para a edição das outras.

Os trechos de programa compreendidos entre as linhas 4100 a 4130, 4200 a 4230, ... , 4700 a 4730 e 4800 a 4830 são semelhantes, podendo-se utilizar um deles para a edição dos outros. O mesmo se aplica aos trechos compreendidos entre as linhas 5000 a 5090 e 5500 a 5590.

ANÁLISE DO PROGRAMA

Na linha de número 210 ocorre a definição do

número máximo de arquivos, o dimensionamento das matrizes correspondentes aos coeficientes, valores rms acumulados e valores da série para elaboração do gráfico, definição do valor de π, o zeramento das variáveis de controle que sinalizam a execução do processamento dos diversos segmentos de programa e predefinidos os recursos de formatação dos gráficos.

Nas linhas 220 e 230 é definido o sprite correspondente ao marcador de coordenadas em tela gráfica.

Na linha de número 240 são solicitadas ao usuário as cores de primeiro plano, fundo e borda, de modo a proporcionar a cada usuário o padrão por ele desejado.

As linhas numeradas de 1000 a 1120 relacionam as opções disponíveis no menu principal e direcionam a execução do programa conforme a opção definida pelo usuário.

As linhas numeradas de 1500 a 1590 processam a entrada de coeficientes e do número de termos considerados, caso for escolhida a opção de introdução destes valores individualmente.

As linhas numeradas de 2000 a 2080 realizam o processamento de espectro de linhas sob forma tabular, sendo o processamento gráfico do mesmo realizado entre as linhas 2090 a 2200. Para melhor apreciação dos resultados são gerados adicionalmente os coeficientes do espectro de linhas normalizados em relação ao maior coeficiente cn encontrado.

As linhas numeradas de 3000 a 3140 relacionam as opções disponíveis no menu dos gráficos e orientam a execução do programa conforme a opção definida pelo usuário.

As linhas numeradas de 3285 a 3340 realizam o cálculo do valores da série e testam as existências dos diversos tipos de simetria. No caso de existência de algum tipo de simetria , calculam-se os valores da série para apenas meio período e, em função do tipo de simetria existente, os do meio período restante, de modo a tornar o processamento mais rápido. São calculados 240 pares de coordenadas, com x variado de -180 a +180 graus, o que determina um passo de cálculo de 1,5 graus.

As linhas numeradas de 3340 a 3850 determinam os valores máximos e mínimos da série para cada um dos quadrantes e intervalos de análise envolvidos, o que

permite também a determinação de um fator de escala adequado ao processamento gráfico, de modo a permitir o pleno aproveitamento da resolução vertical adotada, que é de 160 pontos.

Para maior versatilidade, os recursos de formatação do gráfico (margeamento, quadriculação e inclusão de eixos) são selecionados de forma independente pelo segmento de programa compreendido entre as linhas 3900 a 3925 e processados na subrotina definida entre as linhas 3930 e 3980, a qual é acessada por todos os gráficos a plotar.

A subrotina compreendida entre as linhas 4900 e 4930 permite o retorno a partir das telas gráficas pelo acionamento da barra de espaços.

O segmento de programa para a leitura de arquivo, compreendido entre as linhas 5000 e 5090, e o segmento de programa para a gravação de arquivo, compreendido entre as linhas de 5500 e 5590 possuem o mesmo ordenamento de variáveis, uma vez que os dados estão arquivados de forma serial.

A obtenção dos valores para valores particulares é realizada pelo segmento de programa compreendido entre as linhas 6000 e 6040.

As linhas numeradas de 7000 a 7080 calculam os valores rms (eficazes) da série considerando-se os termos de ordem 0 a n, com n variando de 0 a 40.

As linhas numeradas de 8000 a 8100 imprimem um memorando auxiliar, com explicações sobre a operação do programa.

As linhas numeradas de 8500 a 8600 determinam a subrotina de posicionamento do marcador de coordenadas. Esta subrotina somente pode ser acessada a partir do gráfico base (-180 a +180 graus - opção 1 do menu gráfico), através da linha 4125.

LISTAGEM DO PROGRAMA

A seguir é apresentada a listagem completa do programa em questão. Recomenda-se a duplicação do mesmo e a proteção da fita ou disquete contra a sobreposição de nova gravação.

```
100 REM ******************************
110 REM *                            *
120 REM * PROGRAMA APLICATIVO PARA  A *
130 REM * NALISE GRAFICA DA SERIE TRI *
140 REM * GONOMETRICA DE FOURIER **** *
150 REM * VERSAO 2.0 MSX NOVEMBRO  87 *
160 REM * RAUL M. P. FRIEDMANN ****** *
180 REM * CURITIBA * PARANA BRASIL ** *
190 REM *                            *
200 REM ******************************
210 MAXFILES=2:DIM A!(40),B!(40),C!(40),
CN!(40),RM!(40),Y!(240):CS=0:CE=0:CM=0:P
I!=4*ATN(1):EV$="N":M$="N":Q$="N":E$="S"
:SCREEN 0:WIDTH 40
220 SCREEN 2:FOR I=1 TO 8:READ K$:S$=S$+
CHR$(VAL("&B"+K$)):NEXT I:SPRITE$(0)=S$:
SCREEN 0:WIDTH 40
230 DATA 00010000,00010000,00010000,1111
1110,00010000,00010000,00010000,0000000
240 C1=15:C2=1:C3=1:INPUT"COR DO PRIMEIR
O PLANO (01 A 15) ";C1:PRINT:INPUT"COR D
O FUNDO ******** (01 A 15) ";C2:PRINT:IN
PUT"COR DA BORDA ******** (01 A 15) ";C3
:PRINT:COLOR C1,C2,C3
250 ST=1:N=15
400 FOR I=1 TO N STEP 2:A!(I)=4*SIN(I*PI
!/2)/(I*PI!):NEXT I
1000 REM MENU PRINCIPAL
1010 STRIG(0) OFF
1020 SCREEN 0:PRINT"Programa  Aplicativ
o  para  Analise":PRINT:PRINT"da Serie
 Trigonometrica  de Fourier":PRINT:PRIN
T
1030 PRINT"1 - Introducao de dados .....
........":PRINT
1040 PRINT"2 - Coeficientes e Espectro d
e Linhas":PRINT
1050 PRINT"3 - Graficos ................
........":PRINT
1060 PRINT"4 - Valores Particulares ....
........":PRINT
1070 PRINT"5 - Valores rms .............
........":PRINT
1080 PRINT"6 - Leitura de Arquivo ......
........":PRINT
1090 PRINT"7 - Gravacao de Arquivo .....
```

```
........":PRINT
1100 PRINT"8 - Memorando Auxiliar ......
........":PRINT:PRINT
1110 OP=0:LOCATE 0,22:INPUT"Opcao ";OP:I
F OP<1 OR OP>8 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOT
O 1000
1120 ON OP GOTO 1500,2000,3000,6000,7000
,5000,5500,8000
1500 REM ENTRADA DOS COEFICIENTES
1510 SCREEN 0:PRINT"Numero de harmonicos
 a analisar":PRINT
1520 INPUT"01 < n < 40          n ";N:IF N
<1 OR N>40 OR N-FIX(N)<>0 THEN GOTO 1520

1530 SCREEN 0:PRINT"Numero de  termos  e
m  analise   n = ";:PRINT USING"##";N:PR
INT:PRINT:PRINT
1540 I=100:LOCATE 0,4:PRINT"Para retorno
 ao menu principal     <  **":PRINT:PRIN
T:PRINT
1550 LOCATE 0,8:INPUT"Indice dos termos
a introduzir       ";I:IF I=100 THEN GOTO
 1000 ELSE IF I<0 OR I>N OR I-FIX(I)<>0 T
HEN GOTO 1550
1560 IF I<20 THEN CO=0 ELSE CO=20
1570 SCREEN 0:LOCATE 0,0:PRINT" i        a
(i)       b(i)":FOR K=0 TO 20:LOCATE 0,K+
2:PRINT USING"##";K+CO:LOCATE 3,K+2:PRIN
T USING"+##.#####";A!(K+CO):LOCATE 13,K+
2:PRINT USING"+##.#####";B!(K+CO):NEXT K

1580 LOCATE 24,2:PRINT" (i)  ";I
1590 LOCATE 24,4:NA=A!(I):INPUT"a(i) ";N
A:LOCATE 24,6:NB=B!(I):INPUT"b(i) ";NB:I
F NA<>A!(I) OR NB<>B!(I) THEN A!(I)=NA:B
!(I)=NB:CS=0:GOTO 1530 ELSE GOTO 1530
2000 REM ESPECTRO DE LINHAS
2005 IF CE=1 THEN GOTO 2040
2010 IF CE=0 THEN FOR I=0 TO N:C!(I)=SQR
(A!(I)*A!(I)+B!(I)*B!(I)):NEXT I
2020 CX!=C!(0):FOR I=0 TO N:IF C!(I)>CX!
 THEN CX!=C!(I):NEXT I ELSE NEXT I
2030 FOR I=0 TO N:CN!(I)=C!(I)/CX!:NEXT
I:CE=1
2040 FOR H=0 TO 4:IF 8*H>N THEN GOTO 209
0
```

```
2050 SCREEN 0:PRINT" i          a(i)       b(
i)      c(i)     cn(i)"
2060 FOR I=0 TO 8:LOCATE 0,2*I+2:PRINT U
SING"##";8*H+I:LOCATE 3,2*I+2:PRINT USIN
G"+##.#####";A!(8*H+I):LOCATE 13,2*I+2:P
RINT USING"+##.#####";B!(8*H+I):LOCATE 2
4,2*I+2:PRINT USING"#.#####";C!(8*H+I):L
OCATE 33,2*I+2:PRINT USING"#.#####";CN!(
8*H+I):NEXT I
2070 INPUT"     <  *** ";RT
2080 NEXT H
2090 SCREEN 0:PRINT"Grafico do  Espectro
  de  Linhas":PRINT:PRINT:PRINT
2100 INPUT"Espacamento vertical (s/S/n/N
) ";EV$:IF EV$<>"S" AND EV$<>"s" AND EV$
<>"N" AND EV$<>"N" THEN GOTO 2100
2110 PRINT
2130 REM PREPARACAO DO GRAFICO
2140 SCREEN 2
2150 IF EV$="S" OR EV$="s" THEN FOR X=8
TO 248 STEP 2:FOR Y=8 TO 168 STEP 16:PSE
T(X,Y):NEXT Y:NEXT X
2160 FOR Y=8 TO 168 STEP 16:LINE(4,Y)-(8
,Y):LINE(248,Y)-(252,Y):NEXT Y:FOR X=48
TO 208 STEP 4:PSET(X,6):PSET(X,170):NEXT
 X:LINE(4,4)-(252,172),,B:FOR X=8 TO 248
 STEP 2:PSET(X,8):PSET(X,168):NEXT X
2170 FOR Y=8 TO 168 STEP 2:PSET(8,Y):PSE
T(248,Y):NEXT Y:FOR I=68 TO 188 STEP 20:
PRESET(I,6):PRESET(I,170):NEXT I
2190 FOR I=0 TO N:LINE(48+4*I,168)-(48+4
*I,168-160*CN!(I)):NEXT I
2200 GOSUB 4900:GOTO 1000
3000 REM GRAFICOS
3010 SCREEN 0:PRINT"Menu ...............
........... Grafico":PRINT:PRINT
3020 PRINT"1 - Grafico do intervalo [-18
0ò,+180ò]":PRINT
3030 PRINT"2 - Grafico do intervalo [-18
0ò,+000ò]":PRINT
3040 PRINT"3 - Grafico do intervalo [-09
0ò,+090ò]":PRINT
3050 PRINT"4 - Grafico do intervalo [-00
0ò,+180ò]":PRINT
3060 PRINT"5 - Expansao do 1ò quadrante
..........":PRINT
```

```
3070 PRINT"6 - Expansao do 2ò quadrante
..........":PRINT
3080 PRINT"7 - Expansao do 3ò quadrante
..........":PRINT
3090 PRINT"8 - Expansao do 4ò quadrante
..........":PRINT
3100 PRINT"9 - Retorno ao menu principal
 .........":PRINT:PRINT
3110 OP=9:LOCATE 0,22:INPUT"Opcao ";OP:I
F OP<1 OR OP>9 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOT
O 3000
3120 IF OP=9 THEN GOTO 1000
3130 GOSUB 3200:GOSUB 3400:GOSUB 3900
3140 ON OP GOTO 4100,4200,4300,4400,4500
,4600,4700,4800
3200 REM CALCULO DOS VALORES DA SERIE
3205 SCREEN 0
3210 AA=0:FOR I=0 TO N:AA=AA+ABS(A!(I)):
NEXT I:AA=SGN(AA)
3220 BB=0:FOR I=0 TO N:BB=BB+ABS(B!(I)):
NEXT I:BB=SGN(BB)
3230 CC=0:FOR I=0 TO N STEP 2:CC=CC+ABS(
A!(I))+ABS(B!(I)):NEXT I:CC=SGN(CC)
3240 IF AA=1 AND BB=1 AND CC=1 THEN PRIN
T"A serie nao possui simetria ..........
.":PRINT
3250 IF AA=1 AND BB=0 THEN PRINT"A serie
 possui simetria de funcao   par":PRINT
3260 IF AA=1 AND CC=0 OR BB=1 AND CC=0 T
HEN PRINT"A serie possui simetria de mei
a    onda":PRINT
3270 IF AA=0 AND BB=1 THEN PRINT"A serie
 possui simetria de funcao impar":PRINT
3280 IF AA=0 AND BB=0 THEN PRINT"A serie
 se degenera  para todos valores":PRINT
3285 IF CS=1 THEN GOTO 3340
3290 IF CS=0 AND AA=1 AND BB=1 AND CC=1
THEN FOR I=0 TO 240 STEP ST:Y!(I)=A!(0):
X!=(I-120)*PI!/120:FOR J=1 TO N:Y!(I)=Y!
(I)+A!(J)*COS(J*X!)+B!(J)*SIN(J*X!):NEXT
 J:LOCATE 35,4:PRINT USING"####";I;:NEXT
 I:CS=1
3300 IF CS=0 AND AA=1 AND BB=0 THEN FOR
I=0 TO 120 STEP ST:Y!(I)=A!(0):X!=(I-120
)*PI!/120:FOR J=1 TO N:Y!(I)=Y!(I)+A!(J)
*COS(J*X!):NEXT J:Y!(240-I)=Y!(I):LOCATE
```

```
 35,4:PRINT USING"####";I;:NEXT I:CS=1
3310 IF CS=0 AND AA=0 AND BB=1 THEN FOR
I=0 TO 120 STEP ST:Y!(I)=A!(0):X!=(I-120
)*PI!/120:FOR J=1 TO N:Y!(I)=Y!(I)+B!(J)
*SIN(J*X!):NEXT J:Y!(240-I)=-Y!(I):LOCAT
E 35,4:PRINT USING "####";I;:NEXT I:CS=1

3320 IF CS=0 AND AA=1 AND CC=0 OR CS=0 A
ND BB=1 AND CC=0 THEN FOR I=0 TO 120 STE
P ST:Y!(I)=A!(0):X!=(I-120)*PI!/120:FOR
J=1 TO N STEP 2:Y!(I)=Y!(I)+A!(J)*COS(J*
X!)+B!(J)*SIN(J*X!):NEXT J:Y!(I+120)=-Y!
(I):LOCATE 35,4:PRINT USING "####";I:NEX
T I:CS=1
3340 LOCATE 34,4:INPUT"<    ";RT:RETURN
3400 REM CALCULO DE MAXIMOS E MINIMOS
3410 IF CM=1 THEN GOTO 3760
3420 FOR I=1 TO 4:X!(I)=Y!(60*I-60):N!(I
)=X!(I)
3430 FOR J=60*I-60 TO 60*I STEP ST
3440 IF Y!(J)>X!(I) THEN X!(I)=Y!(J)
3450 IF Y!(J)<N!(I) THEN N!(I)=Y!(J)
3460 NEXT J
3470 NEXT I
3480 REM MAX MIN -180 +180 5
3490 YX!(5)=X!(1):YN!(5)=N!(1)
3500 FOR I=1 TO 4
3510 IF X!(I)>YX!(5) THEN YX!(5)=X!(I)
3520 IF N!(I)<YN!(5) THEN YN!(5)=N!(I)
3530 NEXT I
3540 REM MAX MIN -180 +000 6
3550 IF X!(1)>X!(2) THEN YX!(6)=X!(1) EL
SE YX!(6)=X!(2)
3560 IF N!(1)<N!(2) THEN YN!(6)=N!(1) EL
SE YN!(6)=N!(2)
3570 REM MAX MIN -090 +090 7
3580 IF X!(2)>X!(3) THEN YX!(7)=X!(2) EL
SE YX!(7)=X!(3)
3590 IF N!(2)<N!(3) THEN YN!(7)=N!(2) EL
SE YN!(7)=N!(3)
3600 REM MAX MIN -000 +180 8
3610 IF X!(3)>X!(4) THEN YX!(8)=X!(3) EL
SE YX!(8)=X!(4)
3620 IF N!(3)<N!(4) THEN YN!(8)=N!(3) EL
SE YN!(8)=N!(4)
3630 REM MAX MIN 1 QUADRANTE
```

```
3640 IF X!(3)<=0 AND X!(4)<=0 THEN YX!(1
)=0 ELSE IF X!(3)>X!(4) THEN YX!(1)=X!(3
) ELSE YX!(1)=X!(4)
3650 IF N!(3)<=0 OR N!(4)<=0 THEN YN!(1)
=0 ELSE IF N!(3)<N!(4) THEN YN!(1)=N!(3)
 ELSE YN!(1)=N!(4)
3660 REM MAX MIN 2 QUADRANTE
3670 IF X!(1)<=0 AND X!(2)<=0 THEN YX!(2
)=0 ELSE IF X!(1)>X!(2) THEN YX!(2)=X!(1
) ELSE YX!(2)=X!(2)
3680 IF N!(1)<=0 OR N!(2)<=0 THEN YN!(2)
=0 ELSE IF N!(1)<N!(2) THEN YN!(2)=N!(1)
 ELSE YN!(2)=N!(2)
3690 REM MAX MIN 3 QUADRANTE
3700 IF X!(1)>=0 OR X!(2)>=0 THEN YX!(3)
=0 ELSE IF X!(1)>X!(2) THEN YX!(3)=X!(1)
 ELSE YX!(3)=X!(2)
3710 IF N!(1)>=0 AND N!(2)>=0 THEN YN!(3
)=0 ELSE IF N!(1)<N!(2) THEN YN!(3)=N!(1
) ELSE YN!(3)=N!(2)
3720 REM MAX MIN 4 QUADRANTE
3730 IF X!(3)>=0 OR X!(4)>=0 THEN YX!(4)
=0 ELSE IF X!(3)>X!(4) THEN YX!(4)=X!(3)
 ELSE YX!(4)=X!(4)
3740 IF N!(3)>=0 AND N!(4)>=0 THEN YN!(4
)=0 ELSE IF N!(3)<N!(4) THEN YN!(4)=N!(3
) ELSE YN!(4)=N!(4)
3745 CM=1
3750 REM FORMATACAO PARA MAX MIN
3760 SCREEN 0
3770 LOCATE 0,0:PRINT" Maximos e Minimos
 dos Quadrantes e In-"
3780 LOCATE 0,2:PRINT" tervalos  Especif
icados  nos  Graficos"
3790 LOCATE 1,6:PRINT"1ò Quadr  2ò Quadr
  3ò Quadr  4ò Quadr"
3800 LOCATE 1,14:PRINT"            [-180,0
]  [-90,90]  [-0,180]"
3810 FOR I=0 TO 1:FOR J=0 TO 3:LOCATE 10
*J,8*I+8:PRINT USING"+##.#####";YX!(4*I+
J+1):NEXT J:NEXT I
3820 FOR I=0 TO 1:FOR J=0 TO 3:LOCATE 10
*J,8*I+10:PRINT USING"+##.#####";YN!(4*I
+J+1):NEXT J:NEXT I
3830 IF ABS(YX!(5))>=ABS(YN!(5)) THEN YN
!=-ABS(YX!(5)):YX!=ABS(YX!(5))
```

```
3840 IF ABS(YX!(5))<ABS(YN!(5)) THEN YN!
=-ABS(YN!(5)):YX!=ABS(YN!(5))
3850 LOCATE 1,22:INPUT"<  *** ";RT:RETU
RN
3900 REM PREPARACAO DO GRAFICO
3910 SCREEN 0:INPUT"Margeamento      (s
/S/n/N) ";M$:IF M$<>"S" AND M$<>"s" AND
M$<>"N" AND M$<>"n" THEN GOTO 3910
3920 PRINT:INPUT"Quadriculacao     (s/S/
n/N) ";Q$:IF Q$<>"S" AND Q$<>"s" AND Q$<
>"N" AND Q$<>"n" THEN GOTO 3920
3925 PRINT:INPUT"Inclusao de eixos (s/S/
n/N) ";E$:IF E$<>"S" AND E$<>"s" AND E$<
>"N" AND E$<>"n" THEN GOTO 3925
3930 SCREEN 2
3940 IF Q$="s" OR Q$="S" THEN FOR X=8 TO
 248 STEP 2:FOR Y=8 TO 168 STEP 16:PSET(
X,Y):NEXT Y:NEXT X:FOR Y=8 TO 168 STEP 2
:FOR X=8 TO 248 STEP 20:PSET(X,Y):NEXT X
:NEXT Y
3950 IF M$="S" OR M$="s" THEN FOR Y=8 TO
 168 STEP 16:LINE(4,Y)-(8,Y):LINE(248,Y)
-(252,Y):NEXT Y:FOR X=8 TO 248 STEP 20:L
INE(X,4)-(X,8):LINE(X,168)-(X,172):NEXT
X:LINE(4,4)-(252,172),,B:FOR X=8 TO 248
STEP 2:PSET(X,8):PSET(X,168):NEXT X
3960 IF M$="S" OR M$="s" THEN FOR Y=8 TO
 168 STEP 2:PSET(8,Y):PSET(248,Y):NEXT Y

3980 RETURN
4100 REM GRAFICO -180 +180
4110 IF E$="S" OR E$="s" THEN LINE(8,88)
-(248,88):LINE(128,8)-(128,168)
4120 FOR I=ST TO 240 STEP ST:LINE(I-ST+8
,168-160*(Y!(I-ST)-YN!)/(YX!-YN!))-(I+8,
168-160*(Y!(I)-YN!)/(YX!-YN!)):NEXT I
4125 GOSUB 8500
4130 GOSUB 4900:GOTO 1000
4200 REM GRAFICO -180 +000
4210 IF E$="S" OR E$="s" THEN LINE(8,88)
-(248,88):LINE(248,8)-(248,168)
4220 FOR I=ST TO 120 STEP ST:LINE(2*(I-S
T)+8,168-160*(Y!(I-ST)-YN!)/(YX!-YN!))-(
2*I+8,168-160*(Y!(I)-YN!)/(YX!-YN!)):NEX
T I
4230 GOSUB 4900:GOTO 1000
```

```
4300 REM GRAFICO -090 +090
4310 IF E$="S" OR E$="s" THEN LINE(8,88)
-(248,88):LINE(128,8)-(128,168)
4320 FOR I=60+ST TO 180 STEP ST:LINE(2*(
I-ST-60)+8,168-160*(Y!(I-ST)-YN!)/(YX!-Y
N!))-(2*(I-60)+8,168-160*(Y!(I)-YN!)/(YX
!-YN!)):NEXT I
4330 GOSUB 4900:GOTO 1000
4400 REM GRAFICO -000 +180
4410 IF E$="S" OR E$="s" THEN LINE(8,88)
-(248,88):LINE(8,8)-(8,168)
4420 FOR I=120+ST TO 240 STEP ST:LINE(2*
(I-ST-120)+8,168-160*(Y!(I-ST)-YN!)/(YX!
-YN!))-(2*(I-120)+8,168-160*(Y!(I)-YN!)/
(YX!-YN!)):NEXT I
4430 GOSUB 4900:GOTO 1000
4500 REM 1 QUADRANTE
4510 IF E$="S" OR E$="s" THEN LINE(8,168
)-(248,168):LINE(8,8)-(8,168)
4520 FOR I=120+ST TO 240 STEP ST:IF Y!(I
-ST)>=-ABS(YX!/200) AND Y!(I)>=-ABS(YX!/
200) THEN LINE(2*(I-120-ST)+8,168-160*Y!
(I-ST)/YX!)-(2*(I-120)+8,168-160*Y!(I)/Y
X!)
4530 NEXT I
4540 GOSUB 4900:GOTO 1000
4600 REM 2 QUADRANTE
4610 IF E$="S" OR E$="s" THEN LINE(8,168
)-(248,168):LINE(248,8)-(248,168)
4620 FOR I=ST TO 120 STEP ST:IF Y!(I-ST)
>=-ABS(YX!/200) AND Y!(I)>=-ABS(YX!/200)
 THEN LINE(2*(I-ST)+8,168-160*Y!(I-ST)/Y
X!)-(2*I+8,168-160*Y!(I)/YX!)
4630 NEXT I
4640 GOSUB 4900:GOTO 1000
4700 REM 3 QUADRANTE
4710 IF E$="S" OR E$="s" THEN LINE(8,8)-
(248,8):LINE(248,8)-(248,168)
4720 FOR I=ST TO 120 STEP ST:IF Y!(I-ST)
<=ABS(YX!/200) AND Y!(I)<=ABS(YX!/200) T
HEN LINE(2*(I-ST)+8,8-160*Y!(I-ST)/YX!)-
(2*I+8,8-160*Y!(I)/YX!)
4730 NEXT I
4740 GOSUB 4900:GOTO 1000
4800 REM 4 QUADRANTE
4810 IF E$="S" OR E$="s" THEN LINE(8,8)-
```

```
(248,8):LINE(8,8)-(8,168)
4820 FOR I=120+ST TO 240 STEP ST:IF Y!(I
-ST)<=ABS(YX!/200) AND Y!(I)<=ABS(YX!/20
0) THEN LINE(2*(I-ST-120)+8,8-160*Y!(I-S
T)/YX!)-(2*(I-120)+8,8-160*Y!(I)/YX!)
4830 NEXT I
4840 GOSUB 4900:GOTO 1000
4900 REM PAUSA INTERROMPIDA PELA BARRA
4910 RT=1:ON STRIG GOSUB 4930:STRIG(0)
ON
4920 IF RT=1 THEN GOTO 4920 ELSE RETURN
4930 STRIG(0) OFF:RT=0:RETURN
5000 REM LEITURA DE ARQUIVO
5010 SCREEN 0:L$="N":INPUT"Confirmacao d
e leitura  (n/N/s/S) ";L$:IF L$<>"N" AND
 L$<>"n" AND L$<>"S" AND L$<>"s" THEN GO
TO 5010 ELSE IF L$="N" OR L$="n" THEN GO
TO 1000 ELSE LOCATE 25,2:PRINT"########.
###":LOCATE 0,2:INPUT"Nome do arquivo ..
.... ";AR$
5020 PRINT:PRINT"Leitura  de arquivo em
execucao .....":PRINT
5030 OPEN AR$ FOR INPUT AS # 1
5035 PRINT"variaveis de controle .......
........":PRINT
5040 INPUT #1,N,ST,CS,CE,CR,CM
5045 PRINT"valores dos coeficientes ....
........":PRINT
5050 FOR I=0 TO 40:INPUT #1,A!(I),B!(I),
C!(I),CN!(I),RM!(I):NEXT I
5055 PRINT"valores da serie ............
........":PRINT
5060 FOR I=0 TO 240:INPUT #1,Y!(I):NEXT
I
5065 PRINT"valores maximos e minimos ...
........":PRINT
5070 FOR I=1 TO 8:INPUT #1,YN!(I),YX!(I)
:NEXT I
5080 CLOSE#1
5090 GOTO 1000
5500 REM GRAVACAO DE ARQUIVO
5510 SCREEN 0:G$="N":INPUT"Confirmacao d
e gravacao (s/S/n/N) ";G$:IF G$<>"N" AND
 G$<>"n" AND G$<>"S" AND G$<>"s" THEN GO
TO 5510 ELSE IF G$="N" OR G$="n" THEN GO
TO 1000 ELSE LOCATE 25,2:PRINT"########.
```

```
###":LOCATE 0,2:INPUT"Nome do arquivo ..
.... ";AR$
5520 PRINT:PRINT"Gravacao de arquivo em
execucao .....":PRINT
5530 OPEN AR$ FOR OUTPUT AS # 1
5535 PRINT"variaveis de controle .......
........":PRINT
5540 PRINT#1,N,ST,CS,CE,CR,CM
5545 PRINT"valores dos coeficientes ....
........":PRINT
5550 FOR I=0 TO 40:PRINT #1,A!(I),B!(I),
C!(I),CN!(I),RM!(I):NEXT I
5555 PRINT"valores da serie ............
........":PRINT
5560 FOR I=0 TO 240:PRINT #1,Y!(I):NEXT
I
5565 PRINT"valores maximos e minimos ...
........":PRINT
5570 FOR I=1 TO 8:PRINT #1,YN!(I),YX!(I)
:NEXT I
5580 CLOSE#1
5590 GOTO 1000
6000 REM VALORES PARTICULARES
6010 SCREEN 0:PRINT"Valores     Particul
ares":PRINT
6020 INPUT"Angulo desejado [ ò  ] ";AG:A
R=AG*PI!/180
6030 Y!=A!(0):FOR I=1 TO N:Y!=Y!+A!(I)*C
OS(I*AR)+B!(I)*SIN(I*AR):NEXT I
6040 SCREEN 0:PRINT"x =";:PRINT USING"+#
###.###";AG:PRINT:PRINT"y =";:PRINT USIN
G"+##.#####";Y!:PRINT:INPUT"<  *******
";RT:GOTO 1000
7000 REM VALOR RMS ACCUMULADO
7010 RN!=1:SCREEN 0:INPUT"Referencia par
a normalizacao ";RN!:IF RN!<=0 THEN GOTO
 7010
7015 IF CR=1 THEN GOTO 7030
7020 IF CR=0 THEN RM!(0)=A!(0):FOR I=1 T
O N:RM!(I)=A!(0)^2:FOR J=1 TO I:RM!(I)=R
M!(I)+.5*A!(J)^2+.5*B!(J)^2:NEXT J:RM!(I
)=SQR(RM!(I)):NEXT I:FOR I=N TO 40:RM!(I
)=RM!(N):NEXT I:CR=1
7030 SCREEN 0:PRINT" n        Frms
 n       Frms":PRINT
7040 I1=0:I2=9:I3=-2:GOSUB 7060:I1=20:I2
```

```
=30:I3=40:GOSUB 7060
7055 GOTO 1000
7060 REM SUBROTINA PARA FORMATACAO
7070 FOR I=I1 TO I2:LOCATE 0,2*I-I3:PRIN
T USING"##";I:LOCATE 4,2*I-I3:PRINT USIN
G"##.#####";RM!(I)/RN!:LOCATE 20,2*I-I3:
PRINT USING"##";I+10:LOCATE 24,2*I-I3:PR
INT USING"##.#####";RM!(I+10)/RN!:NEXT I

7080 LOCATE 0,22:INPUT"<     ***** ";RT
7090 RETURN
8000 REM MEMORANDO AUXILIAR
8010 SCREEN 1:WIDTH 32
8020 PRINT"Serie Trigonometrica de  Four
ier":PRINT"Programa  para  Analise  Graf
ica"
8030 PRINT"A resolucao  grafica  do  pad
raomsx permite o tracado de  grafi-cos d
e boa definicao consideran-do-se ate qua
renta harmonicos dafrequencia fundamenta
l ........."
8040 PRINT"A seria em analise pode ter s
euscoeficientes  definidos entre aslinha
s 400 e 800 ou introduzidosindividualmen
te durante a execu-cao do programa .....
..........."
8050 PRINT"A serie em analise pode ser s
al-va  integralmente  pela gravacaoem ar
quivo podendo ser  reanali-sada pela exe
cucao da leitura doarquivo ............
..........."
8055 INPUT"Continuacao ..................
";RT
8060 SCREEN 1:PRINT"O numero de harmonic
os (N)  devese definido na linha 250 ju
nta-mente com o passo de calculo (ST) qu
e normalmente deve assumir ovalor 1 (os
valores 2,4,5  e  10sao viaveis com redu
cao da reso-lucao grafica) .............
...."
8080 PRINT"O retorno a partir dos  grafi
cose  obtido  pelo  acionamento  dabarra
 de espacos ..............."
8085 PRINT"A excecao ocorre  para o graf
icoda serie no intervalo de -180ò a+180ò
. No caso o acionamento  dabarra de espa
```

```
cos aciona a subro-tina de leitura de
coordenadas"
8090 PRINT"O deslocamento do cursor e ob
ti-do por meio das teclas ◀ e ▶ e oretor
no pela tecla ▲ seguida  doacionamento d
a  barra de espacos"
8100 INPUT"Retorno  ao  menu  principal
";RT:GOTO 1000
8500 REM SUBROTINA DO CURSOR GRAFICO
8510 GOSUB 4900:OPEN "GRP:" FOR OUTPUT A
S #2:PRESET(8,180):PRINT#2,"x=
        y=":CLOSE#1
8520 CX=120
8530 CG=STICK(0)
8540 IF CG=0 THEN GOTO 8530
8550 IF CG=1 THEN CLOSE#2:RETURN
8560 IF CG=3 THEN IF CX<240 THEN CX=CX+S
T ELSE CX=0
8570 IF CG=7 THEN IF CX>0 THEN CX=CX-ST
ELSE CX=240
8580 PUT SPRITE 0,(CX+8-3,168-160*(Y!(CX
)-YN!)/(YX!-YN!)-4),C1,0
8590 OPEN "GRP:" FOR OUTPUT AS #1:LINE(2
4,180)-(88,188),C2,BF:PRESET(16,180):PRI
NT#2,USING"+####.###";(CX-120)*1.5:LINE(
184,180)-(248,188),C2,BF:PRESET(176,180)
:PRINT#2,USING"+##.#####";Y!(CX):CLOSE#1

8600 GOTO 8530
```

EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA

A seguir será analisada a série de Fourier representiva de uma onda quadrada padrão, ou seja o patamar e o vale possuem mesmo valor absoluto, e o tempo de duração do patamar e do vale tambem são iguais. Suporemos t=0 no meio do patamar e a amplitude como V=1, de modo a obter-se uma interpretação de resultados mais fácil. A forma de onda em análise corresponde então a f1(t) analisada no início do capítulo com V=1 e apresenta simetria de função par. A série de Fourier correspondente é expressa por:

$$f(t) = (V.4/\pi).\ (\cos(1.w.t)/1 - \cos(3.w.t)/3 + \cos(5.w.t)/5 - \cos(7.w.t)/7 + \ldots\ )$$

A análise será efetuada considerando-se até o harmônico de ordem 15. O programa listado já inclui a definição da série proposta com o número de termos considerado. Isto é realizado nas 250 e 400 do seguinte modo:

```
250 ST=1:N=15
400 FOR I=1 TO N STEP 2:A!(0)=4*SIN(I*PI
!*2)/(I*PI!):NEXT I
```

Após a introdução do comando RUN serão solicitadas as cores de primeiro plano, fundo e borda. Embora isto represente preferências individuais, recomenda-se a seqüência 15-1-1. Para a utilização de terminais de vídeo de fósforo verde também resultam bastante agradáveis as opções 15-6-6 e 15-6-9 (esta última permite visualisar a distribuição do gráfico na SCREEN 2). Após a introdução da cor de borda surge o menu principal.

A opção 1 não deve ser executada pois os coeficientes e o número de termos já foram definidos no trecho inicial do programa.

A opção 8 resulta no memorando auxiliar apresentado nas figuras 3.2 e 3.3 .
Observe-se a relação entre as informações nele contidas e o exemplo em análise.

A opção 2 fornece inicialmente o espectro de linhas sob forma tabular (ver figuras 3.4 e 3.5). Observe-se que a quarta coluna representa os termos do espectro de linhas normalizados, ou seja a divisão de

Figura 3.2 - Memorando Auxiliar - Tela 1

```
Serie Trigonometrica de  Fourier

Programa  para  Analise  Grafica

A resolucao  grafica  do  padrao
msx permite o tracado de  grafi-
cos de boa definicao consideran-
do-se ate quarenta harmonicos da
frequencia fundamental .........

A seria em analise pode ter seus
coeficientes  definidos entre as
linhas 400 e 800 ou introduzidos
individualmente durante a execu-
cao do programa ................

A serie em analise pode ser sal-
va  integralmente  pela gravacao
em arquivo podendo ser  reanali-
sada pela execucao da leitura do
arquivo ........................

Continuacao ................. ? █
```

Figura 3.3 - Memorando Auxiliar - Tela 2

```
O numero de harmonicos (N)  deve
ser definido na linha 250 junta-
mente com o passo de calculo (ST
) que normalmente deve assumir o
valor 1 (os valores 2,4,5  e  10
sao viaveis com reducao da reso-
lucao grafica) .................

O retorno a partir dos  graficos
e  obtido  pelo  acionamento  da
barra de espacos ...............

A excecao ocorre  para o grafico
da serie no intervalo de -180° a
+180°. No caso o acionamento  da
barra de espacos aciona a subro-
tina de leitura  de  coordenadas

O deslocamento do cursor e obti-
do por meio das teclas ◀ e ▶ e o
retorno pela tecla ▲ seguida  do
acionamento da  barra de espacos

Retorno  ao  menu  principal ? █
```

seu valor pelo valor do termo de maior amplitude. Desta forma os termos do espectro de linhas normalizado se situam sempre entre 0 e 1. Na continuidade da análise obtém-se o espectro de linhas sob forma gráfica (figura 3.6). No espectro apresentado foi solicitado o espaçamento vertical, o qual divide o espectro normalizado em 10, permitindo uma fácil avaliação de valores a partir do gráfico.

A opção 3 resulta no menu gráfico apresentado na figura 3.7 .

A escolha da opção 1 do menu gráfico, determina o teste das simetrias existentes e, a seguir no cálculo dos valores da série para um periodo e dos valores máximos e mínimos dos intervalos e quadrantes analisados (ver figura 3.8). Observe-se que na série em questão são indicadas simetrias de função par e de meia-onda, pois a série analisada contém as duas. Após o traçado do gráfico (somente para o intervalo de -180 a +180 graus) (ver figura 3.9) o acionamento da barra de espaços acessa a rotina de movimentação do cursor para a leitura de coordenadas. Para maiores detalhes verifique-se o memorando auxiliar.

Figura 3.4 - Espectro de Linhas sob Forma Tabular

i	a(i)	b(i)	c(i)	cn(i)
0	+0.00000	+0.00000	0.00000	0.00000
1	+1.27324	+0.00000	1.27324	1.00000
2	+0.00000	+0.00000	0.00000	0.00000
3	-0.42441	+0.00000	0.42441	0.33333
4	+0.00000	+0.00000	0.00000	0.00000
5	+0.25465	+0.00000	0.25465	0.20000
6	+0.00000	+0.00000	0.00000	0.00000
7	-0.18189	+0.00000	0.18189	0.14286
8	+0.00000	+0.00000	0.00000	0.00000

<┘ *** ? █

Figura 3.5 - Espectro de Linhas sob Forma Tabular

i	a(i)	b(i)	c(i)	cn(i)
8	+0.00000	+0.00000	0.00000	0.00000
9	+0.14147	+0.00000	0.14147	0.11111
10	+0.00000	+0.00000	0.00000	0.00000
11	-0.11575	+0.00000	0.11575	0.09091
12	+0.00000	+0.00000	0.00000	0.00000
13	+0.09794	+0.00000	0.09794	0.07692
14	+0.00000	+0.00000	0.00000	0.00000
15	-0.08488	+0.00000	0.08488	0.06667
16	+0.00000	+0.00000	0.00000	0.00000

<┘ *** ? █

Figura 3.6 - Espectro de Linhas sob Forma Gráfica

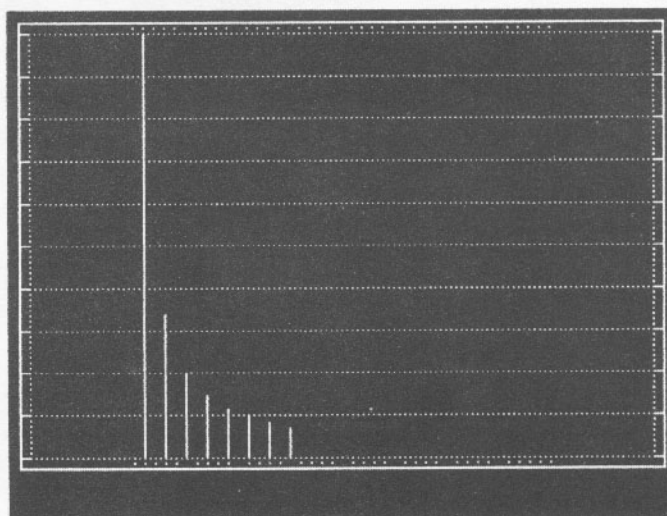



Figura 3.7 - Menu Gráfico

```
Menu ......................... Grafico

1 - Grafico do intervalo [-180°,+180°]
2 - Grafico do intervalo [-180°,+000°]
3 - Grafico do intervalo [-090°,+090°]
4 - Grafico do intervalo [-000°,+180°]
5 - Expansao do 1° quadrante .........
6 - Expansao do 2° quadrante .........
7 - Expansao do 3° quadrante .........
8 - Expansao do 4° quadrante .........
9 - Retorno ao menu principal ........

Opcao ? █
```

Figura 3.8 - Valores Máximos e Mínimos

```
Maximos e Minimos dos Quadrantes e In-
tervalos  Especificados  nos  Graficos

1° Quadr  2° Quadr  3° Quadr  4° Quadr
+1.17601  +1.17601  +0.00000  +0.00000
+0.00000  +0.00000  -1.17601  -1.17601

          [-180,0]  [-90,90]  [-0,180]
+1.17601  +1.17601  +1.17601  +1.17601
-1.17601  -1.17601  -0.00004  -1.17601

<┘ *** ? █
```

Figura 3.9 - Opção 1 - Intervalo de -180 a +180 graus

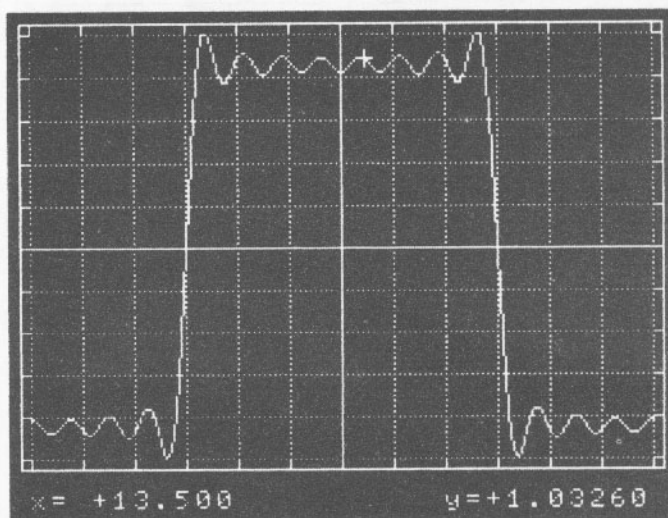



Figura 3.10 - Opção 4 - Expansão do Intervalo [-000 a +180]

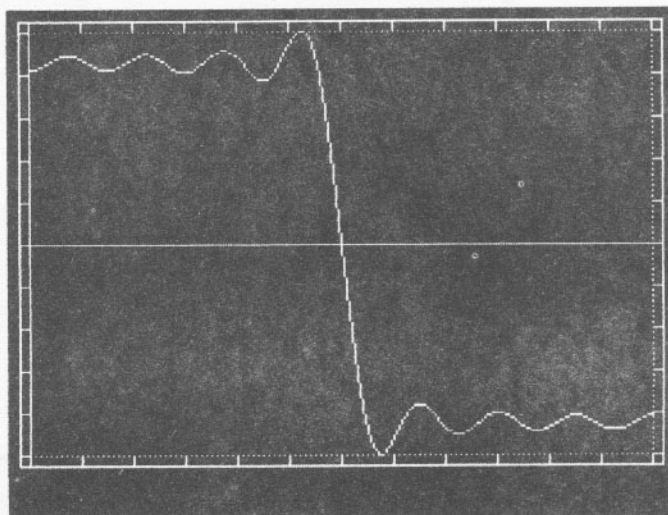



Figura 3.11 - Opção 5 - Expansão do Primeiro Quadrante

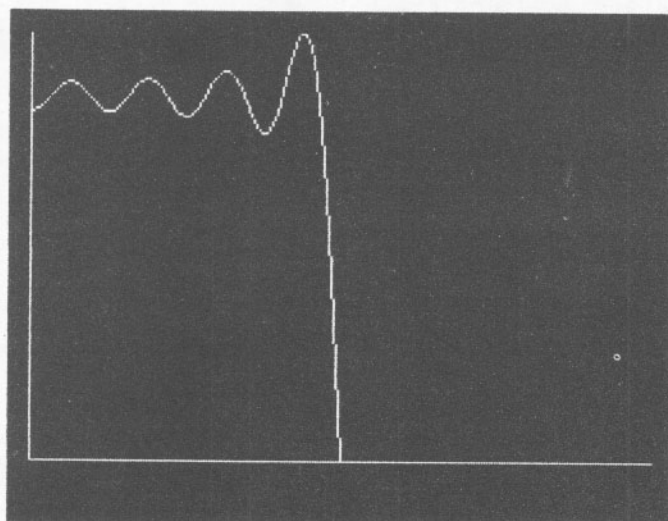



Figura 3.12 - Valores RMS para n Harmônicos Considerados

n	Frms	n	Frms
0	0.00000	10	0.97960
1	0.90032	11	0.98301
2	0.90032	12	0.98301
3	0.94902	13	0.98545
4	0.94902	14	0.98545
5	0.96595	15	0.98727
6	0.96595	16	0.98727
7	0.97447	17	0.98727
8	0.97447	18	0.98727
9	0.97960	19	0.98727

<┘ ***** ? █

Observe-se ainda que quando solicitada a quadriculação o gráfico é divido em 12 segmentos horizontais, o que resulta em 30 graus por divisão. Na vertical são realizadas 10 divisões.

A execução de algumas das outras opções do menu gráfico encontram-se representadas nas figuras 3.10 e 3.11.

A opção 4 fornece o valor da série para valores especificados pelo usuário. O correto funcionamento deste segmento de programa pode ser feito pelo confronto com os valores das coordenadas fornecidas pelo deslocamento do cursor.

A opção 5 apresenta os valores rms da série em função do número de termos considerado (ver figura 3.12). Observe-se que a medida que o número de termos considerados aumenta,o valor rms da série converge para o valor da forma de onda por ela representada. No exemplo analisado o valor rms de f(t) é igual a 1, pois o valor rms de uma onda quadrada padrão é igual ao seu valor médio (de meio periodo) e ao seu valor máximo. Se na referência para normalização nada fosse especificado o programa assumiria o valor 1.

As opções 6 e 7 realizam, respectivamente, a leitura e a gravação da série analisada em arquivo. Se houver um disk drive acoplado ao sistema o arquivo será gravado no drive de uso corrente com todos os caracteres permitidos. Se não houver um disk drive acoplado assume-se como dispositivo de armazenamento o gravador cassete, sendo que neste caso são considerados apenas os seis primeiros caracteres especificados para a nomenclatura do arquivo. Isto é possível devido a estrutura do padrão MSX.

Para a verificação do nome dos arquivos já existentes, no caso de operação com disk drive, pode-se interromper a entrada do pedido do nome do arquivos por meio de CONTROL+STOP, introduzir-se o comando FILES, e após sua execução, continuar o programa com o comando CONT. No caso de operação com gravador cassete tomam-se os cuidados tradicionais.

Para teste destes segmentos de programa pode-se efetuar inicialmente a gravação da série analisada e a posterior leitura.

Recomenda-se nomear os arquivos em relação as formas de onda, simetria e número de termos considerado. Por exemplo, um nome interessante para a forma de onda analisada neste exemplo seria

QUAD15PR.DAT, com QUAD estando relacionado com onda quadrada, 15 com o número de harmônicos considerados, PR com a simetria de função par e DAT por se tratar de um arquivos de dados. No caso de gravação via gravador cassete um nome interessante seria QUA15P.

É possível a transferência de arquivos gravados em disk drive para o gravador cassete e vice-versa. Nestes casos deve-se indicar o dispositivo de armazenamento juntamente com o nome do arquivo (não se preocupe com o fato de a tela não ficar tão bonita) na leitura e na gravação do arquivo. Por exemplo, para a transferência do arquivo QUA15P, gravado em cassete, para o disk drive B (supondo que hajam dois disk drives conectados ao sistema) pode ser efetuada especificando-se o nome do arquivo, por ocasião da leitura, como CAS:QUA15P e, por ocasião da gravação, como B:QUAD15PR.DAT.

PROBLEMAS RESOLVIDOS

01 - Analisar a convergência da série de Fourier correspondente à forma de onda dente-de-serra com simetria de função impar por intermédio da análise da forma de onda resultante para 5, 10, 20 e 40 harmônicos considerados.

Por uma questão de facilidade utilizar-se-á a forma de onda designada na figura 3.1 como f3(t), com valor máximo 1 e valor mínimo -1, (o que resulta em valor médio nulo).

A série de Fourier correspondente é:

$$f(t) = (V.2/\pi).\ (\ sen(1.w.t)/1 + sen(2.w.t)/2 + sen(3.w.t)/3 + sen(4.w.t)/4 + \ldots\ )$$

$a0 = 0$ $an = 0$ $bn = 2.V/(n.\pi)$

A definição do passo de cálculo (vide memorando) e do número de termos considerado é realizada na linha 250. A série é definida entre as linhas 400 e 800. No presente problema definiremos do seguinte modo:

```
250 ST=1:N=5
400 FOR I=1 TO N:A!(I)=2/(I*PI!):NEXT I
```

Figura 3.13 - Onda Dente-de-Serra - 5 Harmônicos

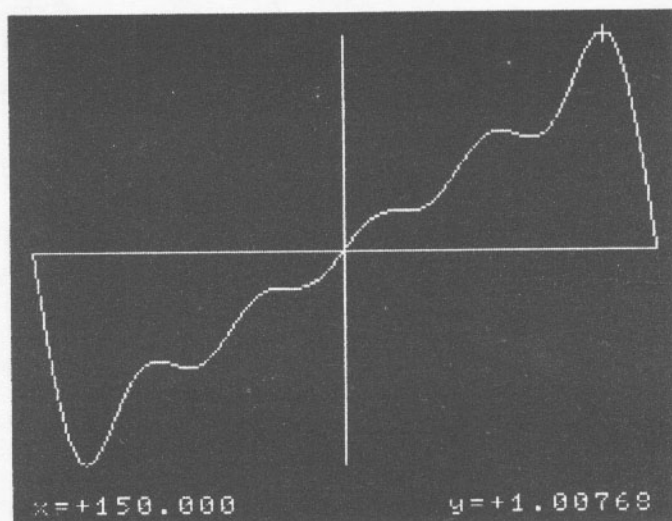



Figura 3.14 - Onda Dente-de-Serra - 10 Harmônicos

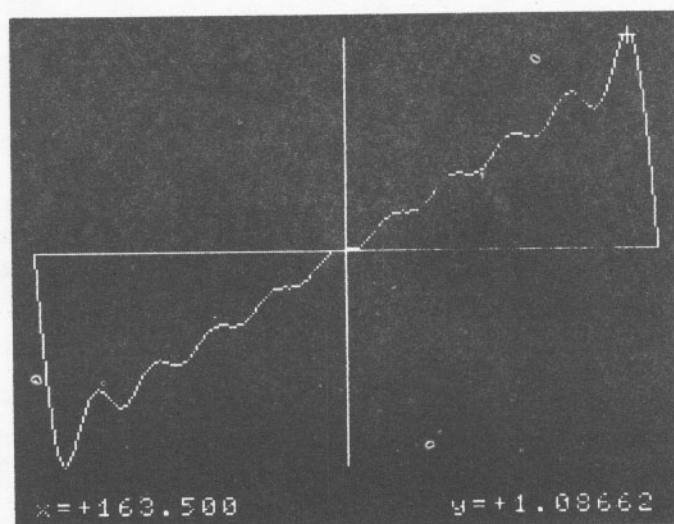



Figura 3.15 - Onda Dente-de-Serra - 20 Harmônicos

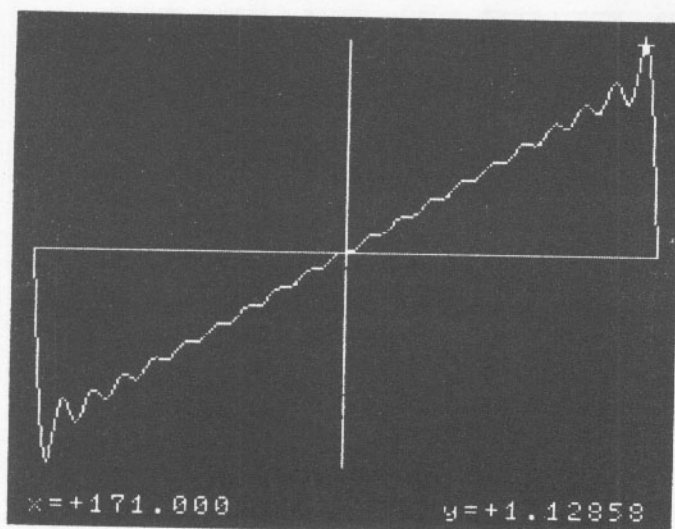
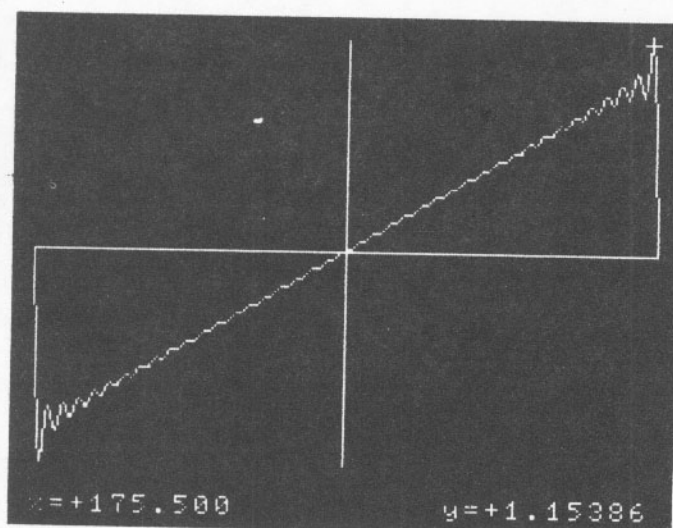



Figura 3.16 - Onda Dente-de-Serra - 40 Harmônicos

que determina a análise da série considerando-se até o harmônico de ordem 5. Para os demais casos faz-se N=10, N=20 e N=40. As figuras 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16 correspondem às formas de onda obtidas para 5, 10, 20 e 40 harmônicos considerados. Observe-se que a série resulta mais proxima da função a medida que aumenta o número de termos considerados.

02 - Determinar as formas de onda da série de Fourier correspondente à forma de onda triangular designada na figura 3.1 como f2(t) para V=1, considerando-se até a influência do quinto harmônico e analisar o espectro de linhas correspondente.

A série analisada é expressa por:

$$f(t) = V.8/(\pi.\pi) . (\cos(1.w.t)/(1.1) + \cos(3.w.t)/(3.3) + \cos(5.w.t)/(5.5) + ...)$$

$$an = V.8/(n.n.\pi.\pi) \qquad n = 1, 3, 5, 7, 9 ...$$

Para isto faz-se no programa:

```
250 ST=1:N=5
400 FOR I=1 TO N STEP 2:A!(I)=8/(I*I*PI!
*PI!):NEXT I
```

A forma de onda obtida para um período completo da série encontra-se na figura 3.17. Observe-se ainda que o espectro correspondente a série proposta decresce rapidamente e que a forma de onda da série representada, mesmo considerando-se um número reduzido de harmônicos, converge rapidamente para a função por ela representada. Para análise da convergência da série proposta pode-se proceder como no exercício proposto de número 01.

03 - Determinar o gráfico da forma de onda da série de Fourier correspondente à forma de onda designada na figura 3.1 como f7(t), considerando-se a influência dos harmônicos de ordem 0 a 15.

Figura 3.17 - Onda Triangular - 5 Harmônicos

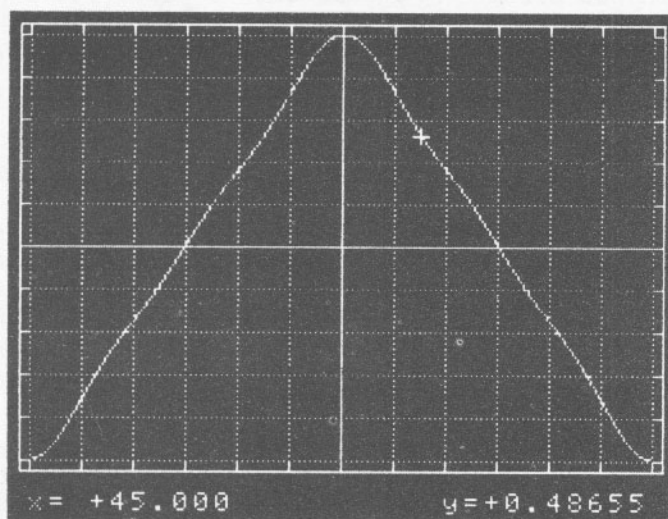
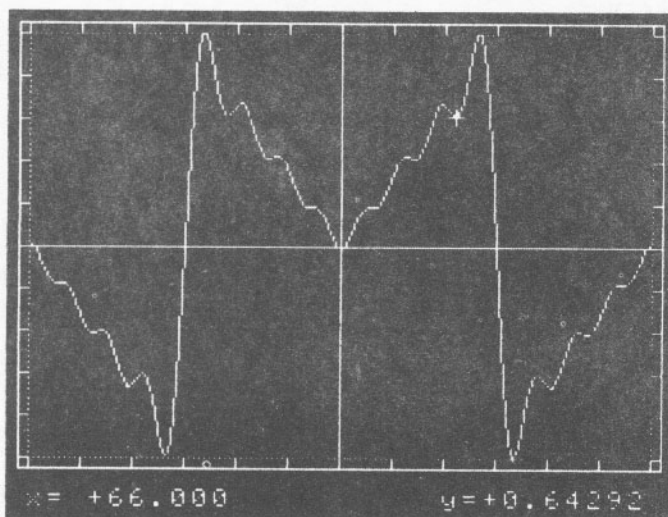



Figura 3.18 - Forma de Onda do Problema 03 - 15 Harmônicos

Observe-se que a forma de onda representada pode ser obtida a partir das formas de onda analisadas no exemplo e no exercício 02. Chamando de g(x) a onda quadrada e h(x) a onda triangular tem-se:

$f(x) = g(x) - h(x) \qquad V = 1$ para g(x) e h(x)

que operadas termo a termo resultam na seguinte expressão do termo an:

$an = V.4/(n.\pi) - V.8/(n.n.\pi.\pi) \qquad n = 1, 3, 5, \ldots$

e que podem ser definidas no programa como:

```
250 ST=1:N=15
400 FOR I=1 TO N STEP 2:A!(I)=4/(I*PI!)-
8/(I^2*PI^2):NEXT I
```

O processamento resulta no gráfico apresentado na figura 3.18. Observe-se a existência de simetria de função impar e de meia-onda, pois as duas funções que compoem a forma de onda apresentada também possuiam tais simetrias.

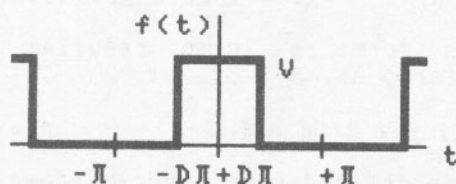
04 - Determinar o espectro de linhas das componentes alternadas da forma de onda retangular representada na figura 3.19 para ciclos de trabalho (D) de 0,05 , 0,1 e 0,2.

A função apresenta simetria par e possui valor médio não nulo, o que resulta na existência de termos cossenoidais e do termo a0. O cálculo dos coeficientes resulta em:

$$an = V/(\pi).\int_{-D.PI}^{+D.\pi} V.dx = V.D$$

e

$$a0 = V/(2.\pi).\int_{-D.\pi}^{+D.\pi} V.\cos(n.x).dx = V.2.\mathrm{sen}(n.\pi.D)/(n.\pi)$$

Figura 3.19 - Problema 4

ou, representando-se de outra forma:

an = V.2.D.sinc(n.π.D)

com sinc(n.π.D) = sen(n.π.D)/(n.π.D).

Para D = 0,05 pode-se definir as linhas 250 e 400 como:

```
250 ST=1:N=40
400 FOR I=1 TO N:A!(0)=1*2*SIN(I*PI!*.05
)/(I*PI!):NEXT I
```

Para D=0,1 e D=0,2 tem-se, respectivamente:

```
250 ST=1:N=40
400 FOR I=1 TO N:A!(0)=1*2*SIN(I*PI!*.1)
/(I*PI!):NEXT I
```

```
250 ST=1:N=40
400 FOR I=1 TO N:A!(0)=1*2*SIN(I*PI!*.2)
/(I*PI!):NEXT I
```

Conforme a proposição do problema somente há interesse na análise das componentes alternadas, de modo que o termo a0 não foi definido em nenhum dos casos.

Figura 3.20 - Espectro de Linhas - D = 0,05

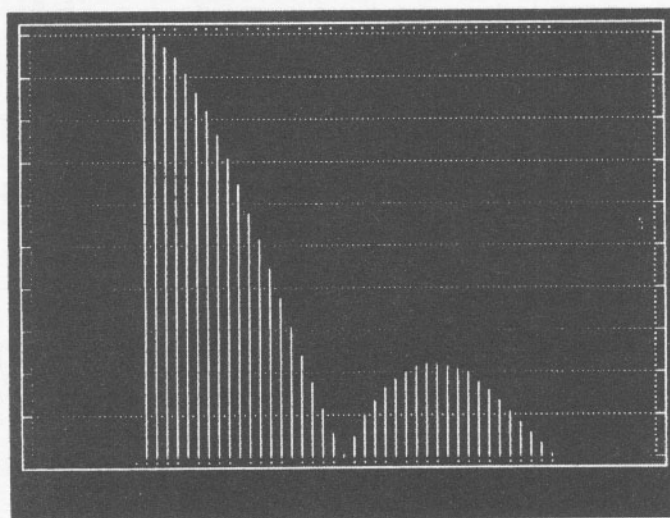



Figura 3.21 - Espectro de Linhas - D = 0,1

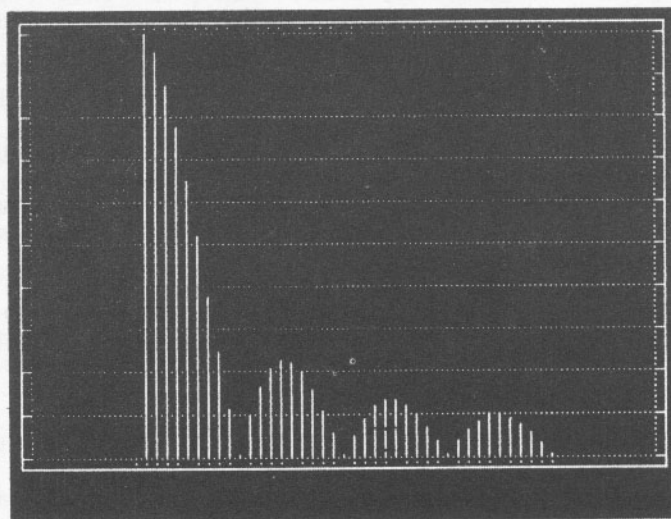
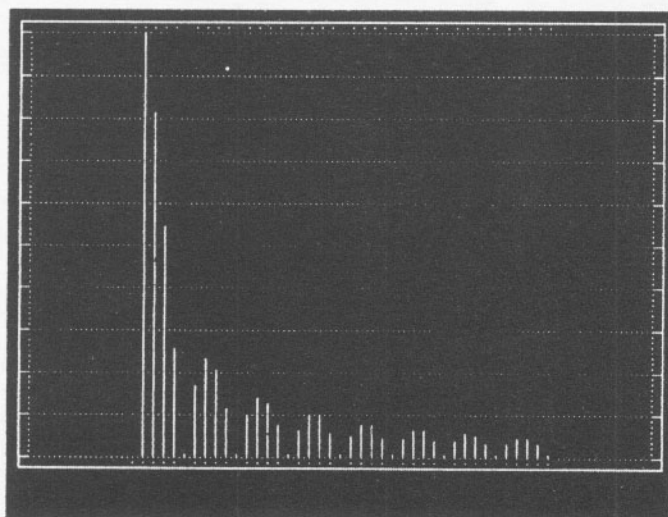
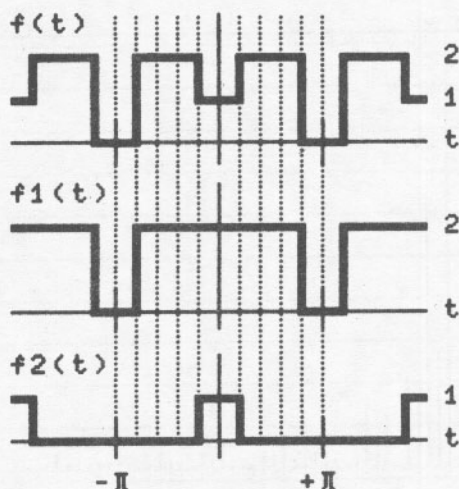



Figura 3.22 - Espectro de Linhas - D = 0,2

Os espectros de linhas correspondentes a D = 0,05, D = 0,1 e D = 0,2 encontram-se, respectivamente, nas figuras 3.20, 3.21 e 3.22. Não há necessidade de cálculo da série, uma vez que pede-se apenas a análise do espectro de linhas.

Observe-se ainda que cada espectro de linhas possui uma envoltória correspondente a uma função seno retificada, sendo que esta função zera cada vez que n.D for um número inteiro. Desta forma, para D = 0,05 o espectro de linhas irá zerar a cada 20 harmônicos e, para D = 0,1 e D = 0,2 , a cada 10 e 5 harmônicos, respectivamente.

05 - Determinar o espectro de linhas e a forma de onda da série de Fourier da forma de onda representada na figura 3.23 considerando-se a influência dos harmônicos de ordem 0 a 40.

A função representada pode ser obtida a partir de duas ondas retangulares variando entre 0 e V com simetria de função par, conforme analisado no exercício anterior.

Figura 3.23 - Problema 05

Deste modo tem-se:

f(x) = g(x) - h(x)

sendo g(x) e h(x) as ondas retangulares com as características mencionadas. A análise das duas individualmente resulta em :

g(x) V = 2 a0 = 2.0,8 = 1,6
D = 0,8 an = 2.2.sen(n.π.0,8)/(n.π)

h(x) V = 1 a0 = 1.0,2 = 0,2
D = 0,2 an = 1.2.sen(n.π.0,2)/(n.π)

A composição g(x)-f(x) pode então ser definida, a nível de programa, como:

```
250 ST=1:N=40
400 A!(0)=1.6-.2:FOR I=1 TO N:A!(I)=2*2*
SIN(I*PI!*.8)/(I*PI!)-1*2*SIN(I*PI!*.2)/
(I*PI!):NEXT I
```

que após o processamento resulta no espectro de linhas e no gráfico apresentados nas figuras 3.24 e 3.25.

Figura 3.24 - Espectro de Linhas - Problema 5

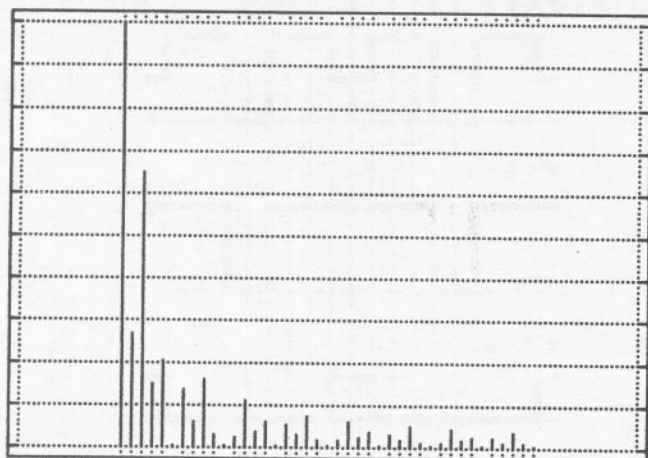



Figura 3.25 - Forma de Onda da Série - Problema 05

06 - Uma tensão vi(t), com a forma de onda idêntica a apresentada no exemplo inicial e freqüência fundamental de 1 kHz, é aplicada a entrada de um filtro passa-faixa ideal de ganho unitário com freqüência de corte inferior 2,55 kHz e corte superior em 25,5 kHz. Determinar, para a tensão de saída, vo(t), o espectro de linhas, a forma de onda e o valor rms.

Sendo o filtro ideal e de ganho unitário, as componentes que possuam freqüência entre 2,55 kHz e 25,5 kHz serão transferidas integralmente para a saída e as componentes acima e abaixo deste valor totalmente atenuadas. Assim sendo, os coeficientes serão os mesmos do exemplo apresentado inicialmente se o harmônico considerado estiver entre 3 e 25, e 0 nos demais casos, o que pode ser posto no programa como:

```
250 ST=1:N=25
400 FOR I=3 TO N STEP 2:A!(I)=4*1/(I*PI!
):NEXT I
```

Figura 3.26 - Espectro de Linhas - Problema 6

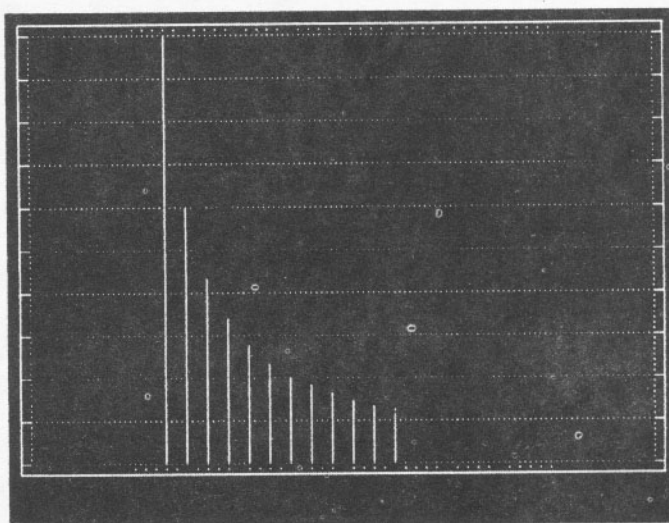



Figura 3.27 - Forma de onda - Problema 6

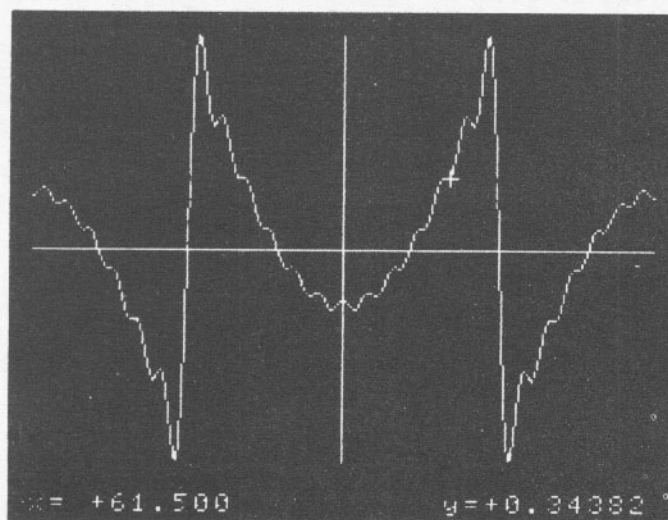



Figura 3.28 - Valores RMS - Problema 7

n	Frms	n	Frms
0	0.00000	10	0.38605
1	0.00000	11	0.39463
2	0.00000	12	0.39463
3	0.30011	13	0.40066
4	0.30011	14	0.40066
5	0.34998	15	0.40513
6	0.34998	16	0.40513
7	0.37287	17	0.40858
8	0.37287	18	0.40858
9	0.38605	19	0.41132

<┘ ***** ? █

Figura 3.29 - Valores RMS - Problema 7

20	0.41132	30	0.41695
21	0.41355	31	0.41695
22	0.41355	32	0.41695
23	0.41540	33	0.41695
24	0.41540	34	0.41695
25	0.41695	35	0.41695
26	0.41695	36	0.41695
27	0.41695	37	0.41695
28	0.41695	38	0.41695
29	0.41695	39	0.41695
30	0.41695	40	0.41695

<┘ ***** ? █

que após o processamento resultam no espectro de linhas apresentado na figura 3.26 e na forma de onda apresentada na figura 3.27. A análise do valor RMS, nas figuras 3.28 e 3.29, demonstra que a consideração de harmônicos de ordem superior a 25 não alteram o valor de saída, o que é coerente com o exposto anteriormente. O valor rms da tensão de saída resulta em 0,41695 V.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

07 - Determinar o gráfico da forma de onda da série de Fourier correspondente à forma de onda f5(t) da figura 3.1, considerando-se a influência dos harmônicos de ordem 0 a 10, 0 a 20 e 0 a 40. Com o auxílio da subrotina de posicionamento do cursor confirmar os valores máximos e mínimos da série, intervalos e quadrantes de análise relatados no programa.

OBSERVAÇÃO - O acerto da resposta fica evidente pela convergência da série para a forma de onda representada.Para maior facilidade de interpretação fazer V = 1. O valor eficaz desta forma de onda é V/SQR(3).

A série é expressa por:

$$f(t) = -(V.4/\pi.\pi) . (\cos(1.x)/(1.1) + \cos(3.x)/(3.3) + \cos(5.x)/(5.5) + ...)$$

$$+ (V.2/\pi) . (sen(1.x)/1 + sen(3.x)/3 + sen(5.x)/5 + ...)$$

08 - Idem para a forma de onda f8(t). O valor rms desta forma de onda é V/SQR(6).

$$f(t) = V/4 - ((V.2)/(\pi.\pi) . (\cos(1.x)/(1.1) + \cos(3.x)/(3.3) + \cos(5.x)/(5.5) + ...)$$

$$+ (V/\pi) . (sen(1.x)/1 - sen(2.x)/2 + sen(3.x)/3 - sen(4.x)/4 + sen(5.x)/5 - sen(6.x)/6 + ..)$$

cujos coeficientes podem ser expressos como:

$$a0 = V/4 \qquad an = (V/(n.n.\pi.\pi)).(\cos(n.\pi)-1)$$

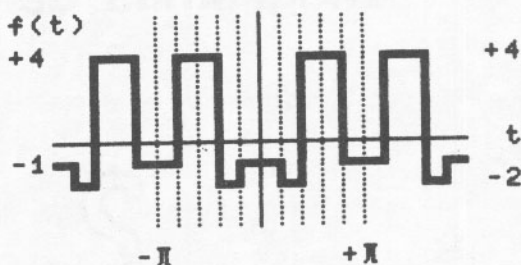
$$bn = -(V/(n.\pi)).\cos(n.\pi)$$

09 - Determinar o espectro de linhas das componentes alternadas da forma de onda retangular representada no exercício 04 para ciclos de trabalho de 0,95 , 0,9 e 0,8.

OBSERVAÇÃO - O acerto das respostas ficará comprovado pela igualdade do espectro de linhas. Isto permite comprovar que duas formas de onda retangulares com níveis de patamar e de vale iguais e ciclos de trabalhos complementares (D2 = 1 - D1) diferem no seu espectro de linhas apenas pelo termo de valor médio. Isto poderá ser comprovado de forma mais evidente refazendo-se os exercícios 4 e 9 com a inclusão do termo de valor médio na análise efetuada.

10 - EXERCÍCIO DESAFIO - Determinar o gráfico da forma de onda da série de Fourier correspondente à forma de onda representada na figura 3.30 considerando-se a influência dos harmônicos de ordem 0 a 40.

SUGESTÃO - Considerar a forma de onda apresentada como a soma de um termo constante e três formas de onda retangulares de modo análogo ao que foi feito no exercício 05. O acerto da resposta é evidente pela convergência da série para a forma de questão. De qualquer forma a resposta está na capa do livro.

Figura 3.30 - Problema 10

CAP. 4

Análise Gráfica dos Diagramas de Bode

ANÁLISE GRÁFICA DOS DIAGRAMAS DE BODE

RESUMO DA TEORIA

A análise e projeto de sistemas de controle realimentados é um assunto bastante vasto e pode ser realizado através de diversos métodos. Os métodos comunmente usados são

1 - Método do Lugar das Raízes
2 - Diagramas de Bode
3 - Diagramas de Nyquist
4 - Diagramas de Nichols

sendo os métodos 2, 3 e 4 técnicas do domínio da freqüência.

As definições e considerações relativas à cada um deste métodos foge à abrangência desta obra. Para um estudo detalhado recomenda-se a consulta ao livro SISTEMAS DE RETROAÇÃO E CONTROLE - Joseph J. Distefano e outros - Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda - Coleção Schaum, analisando-se de modo mais detalhado os capítulos 6, 10, 15 e 16.

As características de um sistema estão relacionadas com sua função de transferência, a qual pode ser expressa no domínio da variável s por

R(s) = P(s) / Q(s)

sendo R(s) a função de transferência e P(s) e Q(s) polinômios em s. Para s = j.w analisa-se o comportamento desta função de transferência no domínio da freqüência e tem-se

R(j.w) = P(j.w) / Q(j.w)

que pode ser expressa por um número complexo na forma polar através dos valores do módulo e do ângulo de fase correspondentes.

O valor do módulo pode ser expresso, em dB, por meio da seguinte equação:

20.log R(j.w)

O diagrama do módulo do ganho expresso em dB

em função de log w (ou de w representada através de uma escala logaritimica) é chamado de diagrama de módulo de Bode e o diagrama do ângulo de fase em função de log w (ou de w representado através de uma escala logaritimica) é chamado diagrama de ângulo de fase de Bode.

Uma função de trasferência qualquer pode ser expressa na forma de Bode e pode-se para ela definir o ganho de Bode. De posse destas informações pode-se facilmente traçar aproximações assintóticas que representam de forma muito aproximada a resposta em freqüência do sistema. Para isto é necessário o conhecimento de todos os pólos e zeros da função de transferência.

Contudo a solução exata é bastante trabalhosa em função do esforço computacional envolvido e as aproximações assintóticas geram erros razoáveis em pólos e zeros da função de transferência situados muito próximos entre si.

Seja a situação de comprovação de uma aproximação assintótica ou a situação de determinação dos diagramas de Bode em que as aproximações assintóticas sejam de difícil execução. A disponibilidade de um programa que execute o traçado destes diagramas e permita o acesso às coordenadas que o definem revela-se bastante interessante.

ATUAÇÃO DO PROGRAMA

A função de transferência

R(s) = P(s) / Q(s)

para s = j.w pode ser expressa por

R(j.w) = P(j.w) / Q(j.w)

Separando-se a parte real e a parte imaginária de cada um destes termos

R(j.w) = (NR + j.NI) / (DR + j.DI)

sendo NR e NI as partes real e imaginária do numerador e DR e DI as mesmas partes para o denominador. Estes

quatro valores são facilmente obtidos a partir da função de transferência e são todos funções da freqüência w e são definidos no programa em segmentos reservados para este propósito.

Uma vez definidas as equações que expressam as quantidades acima pode-se dar início à execução do programa. Inicialmente são solicitadas ao usuário as cores desejadas para o primeiro plano, fundo e borda, o passo de cálculo e a definição do intervalo de análise. Após isto apresenta-se o menu principal.

O traçado dos diagramas de módulo e do do ângulo de fase pode ser realizado separamente ou de forma conjunta. Neste caso os valores de referência para o traçado de cada diagrama devem ter sido previamente especificados.

A opção de traçado do diagrama de módulo fornecerá o módulo mínimo e o modulo máximo (em db) apresentado pela função no intervalo de análise especificado. O programa prevê ainda a possibilidade de transposição do ganho em relação a um valor de referência qualquer, o que é particularmente útil na análise de amplificadores e de filtros, sendo então solicitada a referência para a transposição. Apresentam-se então os valores mínimo e máximo do módulo tranposto e solicitados os valores de referência para o traçado do diagrama. Na sequência é proposto ao usuário o traçado do diagrama. No caso de resposta negativa o programa retorna ao menu principal e no caso de reposta afirmativa serão solicitadas ao usuário as especificações para formatação gráfica. Observe-se que a referência para transposição, as referências para o traçado do diagrama e as especificações para formatação gráfica podem ser redefinidos cada vez que se execute o traçado do diagrama de módulo.

O opção de traçado do diagrama do ângulo de fase acarreta na solicitação ao usuário do intervalo desejado para a representação angular. Uma vez definido este intervalo apresentam-se o valor mínimo e o valor máximo do ângulo de fase no intervalo de análise especificado, solicitadas as referências para o traçado do diagrama. Na seqüência é proposto ao usuário o traçado do diagrama. No caso de resposta negativa o programa retorna ao menu principal e no caso de resposta afirmativa serão solicitadas ao usuário as especificações para formatação gráfica. O intervalo de representação do ângulo de fase, os valores de

referência para o traçado do diagrama e as especificações para formatação gráfica podem ser redefinidos cada vez que se execute o traçado do diagrama de módulo.

A opção de traçado dos dois diagramas simultaneamente resulta na informação que neste caso os valores de referência para o traçado dos dois diagramas deverão ter sido previamente especificados e propõe-se ao usuário o traçado dos diagramas. No caso de resposta negativa o programa retorna ao menu principal e no caso de resposta afirmativa são solicitadas as especificações para a formatação gráfica e executado o traçado dos diagramas sobrepostos. Para redefinição dos valores de referência para o traçado de cada diagrama os segmentos correspondentes de programa deverão ser novamente acessados a partir do menu principal. Porém as especificações para formatação gráfica são redefinidas no segmento de programa de traçado dos diagramas sobrepostos.

A opção 4 permite o cálculo do módulo e do ângulo de fase para valores particulares de w e a opção 5 apresenta o memorando auxiliar.

ANÁLISE DO PROGRAMA

Na linha 210 é definido o número máximo de arquivos manipulados pelo programa, dimensionadas as matrizes correspondentes aos valores da freqüência angular w (W!), do módulo (G!) e do ângulo de fase (T!), zerada a variável indicadora do cálculo dos valores do diagrama (CD), definido o default (condições iniciais) da formatação gráfica e selecionado o modo texto com 40 colunas (SCREEN 0:WIDTH 40).

Nas linhas 220 e 230 é definido o sprite correspondente ao marcador de coordenadas em tela gráfica.

Na linha 240 são solicitadas as cores de primeiro plano, fundo e borda e na linha 250 solicitado o passo de cálculo.

O segmento de programa entre as linhas 500 e 990 pode ser usado para a definição de constantes e funções. No programa como apresentado está definida apenas a constante π na linha 510.

Entre as linhas 1000 e 1060 são solicitados ao usuario os valores da mínima e da máxima freqüência para traçado dos diagramas.

O segmento de programa compreendido entre as linhas 1500 e 1580 apresenta o menu principal e direciona a execução do programa conforme a opção definida pelo usuário.

Entre as linhas 3000 e 3120 são calculados os valores do diagrama, determinados os valores mínimo e máximo do módulo para o intervalo de análise proposto, solicitada a referência para transposição, determinados os valores mínimo e máximo do módulo transposto e solicitadas as referências para traçado do diagrama de módulo. O traçado do diagrama de módulo é executado entre as linhas 3200 e 3260.

Entre as linhas 3500 e 3550 apresentam-se as informações relativas ao traçado dos diagramas com superposição e direciona-se o programa neste sentido.

Entre as linhas 4000 e 4150 executa-se um processamento semelhante ao das linhas 3120, porém sem transposição e apresenta-se também um menu de opções de enquadramento do ângulo de fase. O traçado do diagrama de módulo é executado entre as linhas 4200 e 4260.

A subrotina entre as linhas 4500 e 4600 enquadra os ângulos de fase no intervalo especificado para sua apresentação. Este intervalo é definido na subrotina conpreendida entre as linhas 4700 e 4780.

O memorando auxiliar está compreendido entre as linhas 5000 e 5180.

Os valores particulares são calculados entre as linhas 6000 e 6100.

Os valores que definem o diagrama são calculados no segmento de programa compreendido entre as linhas 8000 e 8090.

A transformação de coordenadas retangulares em coordenadas polares é executada pela subrotina compreendida entre as linhas 8200 e 8270.

A movimentação do marcador de coordenadas, a impressão das mesmas e o retorno ao menu principal a partir das telas gráficas são processados no segmento de programa conpreendido entre as linhas 8600 e 8710.

As especificações para formatação gráfica e o processamento das mesmas são realizados pelo segmento de programa compreendidos entre as linhas 8800 e 8970.

Entre as linhas 9000 e 9400 encontra-se a subrotina onde são definidas as partes real e imaginária do numerador (P(s)) e do denominador (Q(s))

LISTAGEM DO PROGRAMA

```
100 REM ********************************
110 REM *                              *
120 REM * PROGRAMA APLICATIVO PARA  A *
130 REM * NALISE GRAFICA DOS DIAGRAMA *
140 REM * S DE BODE DE MODULO E  FASE *
150 REM * VERSAO 3.5 MSX NOVEMBRO  87 *
160 REM * RAUL M. P. FRIEDMANN ****** *
180 REM * CURITIBA * PARANA BRASIL ** *
190 REM *                              *
200 REM ********************************
210 MAXFILES=1:DIM W!(240),G!(240),T!(24
0):CD=0:IT=4:DX$="N":LX$="N":LY$="N":M$=
"S":SCREEN 0:WIDTH 40:KEYOFF
220 SCREEN 2:FOR I=1 TO 8:READ K$:S$=S$+
CHR$(VAL("&B"+K$)):NEXT I:SPRITE$(0)=S$:
SCREEN 0:WIDTH 40
230 DATA 00010000,00010000,00010000,1111
1110,00010000,00010000,00010000,0000000
240 C1=15:C2=1:C3=1:INPUT"COR DO PRIMEIR
O PLANO (01 A 15) ";C1:PRINT:INPUT"COR D
O FUNDO ******** (01 A 15) ";C2:PRINT:IN
PUT"COR DA BORDA ******** (01 A 15) ";C3
:PRINT:COLOR C1,C2,C3
250 ST=1:INPUT"PASSO DE CALCULO ********
********
                        *** ( 1 / 2 / 4 / 8 / 12
/ 24 ) ";ST
500 REM DEFINICAO DE CONSTANTES E FUNCOE
S
510 PI!=4*ATN(1)
1000 REM INTERVALO DE ANALISE
1010 SCREEN 0:PRINT"wmin - valor inicial
 de  w  para analise"
1020 PRINT"wmax - valor  final  de  w  p
ara analise":PRINT
1030 LOCATE 0,5:INPUT"wmin ";WN!:IF WN!<
=0 THEN LOCATE 0,7:PRINT"wmin ≥ 0":GOTO
1030 ELSE LOCATE 0,5:PRINT"wmin = ";:PRI
NT USING"+#.#####^^^^";WN!:PRINT
1040 LOCATE 0,7:INPUT"wmax ";WX!
1050 IF WX!<=WN! THEN LOCATE 0,10:PRINT"
wmax > wmin ":PRINT:GOTO 1040 ELSE LOCAT
E 0,7:PRINT"wmax = ";:PRINT USING"+#.###
##^^^^";WX!
1060 LOCATE 0,10:INPUT"Menu Principal ..
................ <┘ ";RT
```

```
1500 REM MENU PRINCIPAL
1510 SCREEN 0:PRINT"Analise  dos  Diagra
mas  de  Bode  de
                    Modulo e de Fase  a
 Partir  de  F(s)":PRINT:PRINT
1520 PRINT"01 - Diagrama  de Modulo ....
  [ dB ]":PRINT
1530 PRINT"02 - Diagrama  de Fase ......
  [  ° ]":PRINT
1540 PRINT"03 - Diagramas de Modulo  e
de  Fase":PRINT
1550 PRINT"04 - Valores Particulares ...
........":PRINT
1560 PRINT"05 - Memorando auxiliar .....
........":PRINT:PRINT
1570 OP=0:INPUT"Opcao ..................
.........  ";OP:IF OP<1 OR OP>5 OR OP-FIX
(OP)<>0 THEN GOTO 1500
1580 ON OP GOTO 3000,4000,3500,6000,5000

3000 REM DIAGRAMA DE MODULO
3010 IF CD=0 THEN GOSUB 8000
3020 IF OP=3 THEN GOTO 3200 ELSE SCREEN
0:PRINT"Modulos  minimo   e   maximo
 ":PRINT
3030 PRINT"Gmin  = ";:PRINT USING"+####.
###";GN!;:PRINT" [ dB ]":PRINT
3040 PRINT"Gmax  = ";:PRINT USING"+####.
###";GX!;:PRINT" [ dB ]":PRINT:PRINT
3050 PRINT"Referencia para transposicao"
:PRINT
3060 INPUT"Gt     ";GT!:LOCATE 0,9:PRINT"
Gt    = ";:PRINT USING"+####.###";GT!;:P
RINT" [ dB ]":PRINT
3070 HN!=GN!-GT!:PRINT"Gtmin = ";:PRINT
USING"+####.###";HN!;:PRINT" [ dB ]":PRI
NT
3080 HX!=GX!-GT!:PRINT"Gtmax = ";:PRINT
USING"+####.###";HX!;:PRINT" [ dB ]":PRI
NT:PRINT
3090 PRINT"Referencias para  o  grafico"
:PRINT
3100 INPUT"Gmin  = ";IN!:LOCATE 0,18:PRI
NT"Gmin  = ";:PRINT USING"+####.###";IN!
;:PRINT" [ dB ]":PRINT
3110 LOCATE 0,20:INPUT"Gmax  = ";IX!:IF
```

```
IX!<=IN! THEN GOTO 3110 ELSE LOCATE 0,20
:PRINT"Gmax  = ";:PRINT USING"+####.###"
;IX!;:PRINT" [ dB ]":PRINT:PRINT
3120 LOCATE 0,22:INPUT"Tracado do diagra
ma  (s/n) ";TD$:IF TD$<>"s" AND TD$<>"S"
 AND TD$<>"n" AND TD$<>"N" THEN GOTO 312
0 ELSE IF TD$="n" OR TD$="N" THEN GOTO 1
500 ELSE GOSUB 8800:GR=1
3200 REM TRACADO DO DIAGRAMA
3210 FOR I=ST TO 240 STEP ST
3220 X=I+8:H!=G!(I)-GT!:Y=168-160*(H!-IN
!)/(IX!-IN!)
3230 XX=I+8-ST:HH!=G!(I-ST)-GT!:YY=168-1
60*(HH!-IN!)/(IX!-IN!)
3240 IF Y>=8 AND Y<=168 THEN IF YY>=8 AN
D YY<=168 THEN LINE(X,Y)-(XX,YY)
3250 NEXT I
3260 IF OP=3 THEN GOTO 4200 ELSE GR=1:GO
SUB 8600:GOTO 1500
3500 REM TRACADOS DOS DIAGRAMAS SOBREPOS
TOS
3510 SCREEN 0:PRINT"Para o tracado dos d
iagramas sobrepostos
                    os valores de refere
ncia para o  tracado
                    de cada um devem ter
 sido  especificados":PRINT
3520 PRINT"Os valores  de  referencia es
pecificados
             para o grafico de cada diagra
ma serao u-
             sados  para  o  tracado com s
obreposicao":PRINT
3530 PRINT"A  formatacao do graficos par
a o tracado
             dos  diagramas  sobrepostos
sera  rede-
             finica  na  sequencia  de  pr
ocessamento":PRINT
3540 INPUT"Tracado dos diagramas sobrepo
stos  (s/n)
             ";TR$:IF TR$<>"s" AND TR$<>"S
" AND TR$<>"n" AND TR$<>"N" THEN GOTO 35
00 ELSE IF TR$="n" OR TR$="N" THEN GOTO
1500
3550 GOSUB 8800:GR=1:GOTO 3200
```

```
4000 REM DIAGRAMA DE FASE
4010 IF CD=0 THEN GOSUB 8000
4020 IF OP=3 THEN GOTO 4200 ELSE GOSUB 4
700
4030 FOR I=0 TO 240 STEP ST
4040 TT!=T!(I):GOSUB 4500:T!(I)=TT!
4050 IF I=0 THEN TX!=T!(I):TN!=T!(I)
4060 IF T!(I)>TX! THEN TX!=T!(I)
4070 IF T!(I)<TN! THEN TN!=T!(I)
4080 NEXT I
4090 SCREEN 0:PRINT"Fase minima  e  fase
 maxima":PRINT
4100 PRINT"θmin  = ";:PRINT USING"+#####.
###";TN!;:PRINT" [  ° ]":PRINT
4110 PRINT"θmax  = ";:PRINT USING"+#####.
###";TX!;:PRINT" [  ° ]":PRINT:PRINT
4120 PRINT"Referencias para  o  grafico"
:PRINT
4130 INPUT"θmin  = ";NI!:LOCATE 0,9:PRIN
T"θmin  = ";:PRINT USING"+#####.###";NI!;
:PRINT" [  ° ]":PRINT
4140 LOCATE 0,11:INPUT"θmax  = ";XI!:IF
XI!<= NI! THEN GOTO 4140 ELSE LOCATE 0,1
1:PRINT"θmax  = ";:PRINT USING"+#####.###
";XI!;:PRINT" [  ° ]":PRINT:PRINT
4150 LOCATE 0,14:INPUT"Tracado do diagra
ma  (s/n) ";TD$:IF TD$<>"s" AND TD$<>"S"
 AND TD$<>"n" AND TD$<>"N" THEN GOTO 415
0 ELSE IF TD$="n" OR TD$="N" THEN GOTO 1
500 ELSE GOSUB 8800
4200 REM TRACADO DO DIAGRAMA
4210 FOR I=ST TO 240 STEP ST
4220 X=I+8::Y=168-160*(T!(I)-NI!)/(XI!-N
I!)
4230 XX=I+8-ST:YY=168-160*(T!(I-ST)-NI!)
/(XI!-NI!)
4240 IF Y>=8 AND Y<=168 THEN IF YY>=8 AN
D YY<=168 THEN LINE(X,Y)-(XX,YY)
4250 NEXT I
4260 GR=2:GOSUB 8600:GOTO 1500
4500 REM SUBROTINA PARA ENQUADRAMENTO DE
 FASE NO  INTERVALO PEDIDO
4510 REM DE FASE NO  INTERVALO PEDIDO
4520 IF IT=1 AND TT!<0 THEN TT!=TT!+360:
GOTO 4520
4530 IF IT=2 AND TT!<=0 THEN TT!=TT!+360
```

```
:GOTO 4530
4540 IF IT=3 AND TT!<-180 THEN TT!=TT!+3
60:GOTO 4540
4550 IF IT=3 AND TT!>=180 THEN TT!=TT!-3
60:GOTO 4550
4560 IF IT=4 AND TT!<=-180 THEN TT!=TT!+
360:GOTO 4560
4570 IF IT=4 AND TT!>180 THEN TT!=TT!-36
0:GOTO 4570
4580 IF IT=5 AND TT!>=0 THEN TT!=TT!-360
:GOTO 4580
4590 IF IT=6 AND TT!>0 THEN TT!=TT!-360:
GOTO 4590
4600 RETURN
4700 REM OPCOES PARA ENQUADRAMENTO DO AN
GULO DE FASE
4710 SCREEN 0:PRINT"Angulo  de  fase - o
pcoes de
                    representacao angula
r ......":PRINT:PRINT
4720 PRINT"01 - Intervalo [+000°,+360°["
:PRINT
4730 PRINT"02 - Intervalo ]+000°,+360°]"
:PRINT
4740 PRINT"03 - Intervalo [-180°,+180°["
:PRINT
4750 PRINT"04 - Intervalo ]-180°,+180°]"
:PRINT
4760 PRINT"05 - Intervalo [-360°,-000°["
:PRINT
4770 PRINT"06 - Intervalo ]-360°,-000°]"
:PRINT:PRINT
4780 INPUT"Opcao ..................... ";IT
:IF IT<1 OR IT>6 OR IT-INT(IT)<>0 THEN G
OTO 4700 ELSE RETURN
5000 REM MEMORANDO AUXILIAR
5010 SCREEN 0:PRINT"Analise  dos  Diagra
mas  de  Bode  de
                    Modulo e de Fase  a
 Partir  de  F(s)":PRINT
5020 PRINT
5030 PRINT"F(S) = P(S) / Q(S)  onde para
 s = j*w":PRINT
5040 PRINT"P(s) = NR   + j*NI
      e"
5050 PRINT"Q(s) = DR   + j*DI":PRINT
```

```
5060 PRINT"NR - Parte  real do numerador
 *******"
5070 PRINT"NI - Parte  imaginaria do num
erador *"
5080 PRINT"DR - Parte  real do denominad
or *****"
5090 PRINT"DI - Parte  imaginaria do den
ominador":PRINT
5100 PRINT"NR! - linhas 9010 a 9090  NR!
 = f(W!)"
5110 PRINT"NI! - linhas 9110 a 9190  NI!
 = f(W!)"
5120 PRINT"DR! - linhas 9210 a 9290  DR!
 = f(W!)"
5130 PRINT"DI! - linhas 9310 a 9320  DI!
 = f(W!)":PRINT:PRINT
5140 INPUT"Continuacao ..................
... <┘ ";RT
5150 SCREEN 1:WIDTH 32
5160 PRINT"Controle de Tela  Grafica":PR
INT:PRINT
5170 PRINT"            retorno
                                  marca
dor     ▲     marcador               ◀
  ▶               para esq     ▼    para
 dir
          proxima"
5180 PRINT:PRINT:INPUT"Menu Principal ..
... <┘ ";RT:GOTO 1500
6000 REM VALORES PARTICULARES
6010 SCREEN 0:PRINT"Valores          Par
ticulares":PRINT
6020 PRINT"Frequencia angular  [ rad/s ]
 ":PRINT:INPUT W!:PRINT
6030 PRINT"Ref. de tranposicao [   dB  ]
 ":PRINT:INPUT GT!:PRINT
6040 GOSUB 4700
6050 GOSUB 9000:DD!=DR!^2+DI!^2:A!=(NR!*
DR!+NI!*DI!)/DD!:B!=(-NR!*DI!+NI!*DR!)/D
D!:GOSUB 8200:G!=20*LOG(P!)/LOG(10):TT!=
T!:GOSUB 4500:T!=TT!
6060 SCREEN 0:PRINT"w  = ";:PRINT USING"
##.###^^^^";W!;:PRINT"   [ rad/s ]":PRIN
T
6070 PRINT"G  =  ";:PRINT USING"+####.##
#";G!;:PRINT"   [   dB  ]":PRINT
```

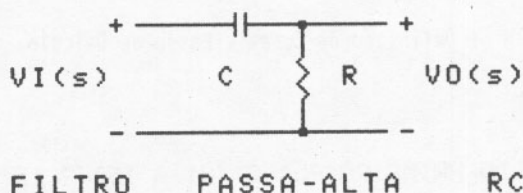
```
6080 PRINT"Gt =  ";:PRINT USING"+####.##
#";G!-GT!;:PRINT"   [  dB  ]":PRINT
6090 PRINT"θ  =  ";:PRINT USING"+####.##
#";T!;:PRINT"   [  °  ]":PRINT
6100 INPUT"Retorno ao menu principal ";R
T:GOTO 1500
8000 REM CALCULO DO DIAGRAMA
8010 SCREEN(0):PRINT" PROCESSAMENTO DE D
ADOS       (0 A 240)"
8020 FOR I=0 TO 240 STEP ST:LOCATE 0,2:P
RINT I
8030 LW=LOG(WN!)+I*(LOG(WX!)-LOG(WN!))/2
40:W!=EXP(LW):W!(I)=W!:GOSUB 9000
8040 DD!=DR!^2+DI!^2:A!=(NR!*DR!+NI!*DI!
)/DD!:B!=(-NR!*DI!+NI!*DR!)/DD!:GOSUB 82
00
8050 G!(I)=20*LOG(P!)/LOG(10):T!(I)=T!
8060 IF I=0 THEN GN!=G!(I):GX!=G!(I):TN!
=T!(I):TX=T!(I)
8070 IF G!(I)>GX! THEN GX!=G!(I)
8080 IF G!(I)<GN! THEN GN!=G!(I)
8090 NEXT I:CD=1:RETURN
8200 REM RETANGULAR POLAR
8210 P!=SQR(A!^2+B!^2)
8220 IF A!=0 THEN T!=SGN(B!)*.5*PI!
8230 IF A!>0 THEN T!=ATN(B!/A!)
8240 IF A!<0 THEN T!=ATN(B!/A!)+PI!
8250 IF A!=0 AND B!=0 THEN T!=0
8260 T!=T!*180/PI!:P!=SQR(A!^2+B!^2):RET
URN
8270 RETURN
8400 REM PAUSA INTERROMPIDA PELA BARRA
8410 RT=1:ON STRIG GOSUB 8430:STRIG(0)
ON
8420 IF RT=1 THEN GOTO 8420 ELSE RETURN
8430 STRIG(0) OFF:RT=0:RETURN
8600 REM SUBROTINA DO MARCADOR DE COORDE
NADAS
8610 OPEN"GRP:" FOR OUTPUT AS #1:CX=120
8620 CG=STICK(0)
8630 IF CG=0 THEN GOTO 8620
8640 IF CG=1 THEN CLOSE#1:RETURN
8650 IF CG=3 THEN IF CX<240 THEN CX=CX+S
T ELSE GX=0
8660 IF OP=3 THEN IF CG=5 THEN IF GR=1 T
HEN GR=2 ELSE IF GR=2 THEN GR=1
```

```
8670 IF CG=7 THEN IF CX>0 THEN CX=CX-ST
ELSE CX=240
8680 IF GR=1 THEN Y=168-160*(G!(CX)-GT!-
IN!)/(IX!-IN!):IF Y>=8 AND Y<=168 THEN P
UT SPRITE 0,(CX+8-3,Y-4),C1,0 ELSE GOTO
8620
8690 IF GR=2 THEN Y=168-160*(T!(CX)-NI!)
/(XI!-NI!):IF Y>=8 AND Y<=168 THEN PUT S
PRITE 0,(CX+8-3,Y-4),C1,0 ELSE GOTO 8620

8700 LINE(0,180)-(255,188),C2,BF:PRESET(
0,180):PRINT#1,"w=":PRESET(8,180):PRINT#
1,USING"##.###^^^^";W!(CX):PRESET(92,180
):PRINT#1,"Gt=":PRESET(100,180):PRINT#1,
USING"+####.###";G!(CX)-GT!
8710 PRESET(176,180):PRINT#1,"θ=":PRESET
(192,180):PRINT#1,USING"+###.###";T!(CX)
:GOTO 8620
8800 REM FORMATACAO DOS GRAFICOS
8810 REM DEFINICAO DA FORMATACAO GRAFICA

8820 SCREEN 0:PRINT"Formatacao  Para  Tr
acado dos Diagramas":PRINT:PRINT
8830 DX=(LOG(WX!/WN!)/LOG(10)):IF DX-FIX
(DX)=0 THEN PRINT"Ha ";:PRINT USING"##";
DX;:PRINT" decadas no intervalo  [xmin,x
max]":PRINT
8840 INPUT"Divisao horizontal em decadas
 (s/n) ";DX$:IF DX$<>"s" AND DX$<>"S" AN
D DX$<>"n" AND DX$<>"N" THEN GOTO 8840 E
LSE IF DX>=1 AND DX<=3 THEN SX=1 ELSE IF
 DX>=4 AND DX<=6 THEN SX=3 ELSE SX=9
8850 IF DX$="s" OR DX$="S" THEN LX$="N":
PRINT:GOTO 8880 ELSE PRINT
8860 INPUT"Divisao horizontal linear
 (s/n) ";LX$:IF LX$<>"s" AND LX$<>"S" AN
D LX$<>"n" AND LX$<>"N" THEN GOTO 8860 E
LSE PRINT
8870 IF LX$="s" OR LX$="S" THEN INPUT"Nu
mero de intervalos        (1 a 30) ";NX:IF
 NX<1 OR NX>30 THEN GOTO 8870 ELSE PRINT

8880 INPUT"Divisao   vertical linear
 (s/n) ";LY$:IF LY$<>"s" AND LY$<>"S" AN
D LY$<>"n" AND LY$<>"N" THEN GOTO 8880 E
LSE PRINT
```

```
8890 IF LY$="s" OR LY$="S" THEN INPUT"Nu
mero de intervalos         (1 a 20) ";NY:IF
 NY<1 OR NY>20 THEN GOTO 8890 ELSE PRINT

8900 INPUT"Margeamento
 (s/n) ";M$:IF M$<>"s" AND M$<>"S" AND M
$<>"n" AND M$<>"N" THEN GOTO 8900 ELSE P
RINT
8910 INPUT"Confirmacao de especificacoes
 (s/n) ";C$:IF C$<>"s" AND C$<>"S" AND C
$<>"n" AND C$<>"N" THEN GOTO 8920 ELSE I
F C$="n" OR C$="N" THEN GOTO 8800
8920 SCREEN 2
8930 IF M$="s" OR M$="S" THEN FOR I=8 TO
 248 STEP 2:PSET(I,8):PSET(I,168):NEXT I
:FOR I=8 TO 168 STEP 2:PSET(8,I):PSET(24
8,I):NEXT I:IF M$="s" OR M$="S" THEN LIN
E(4,4)-(252,172),,B
8940 IF LY$="s" OR LY$="S" THEN FOR I=8
TO 248 STEP 2:FOR J=8 TO 168 STEP 160/NY
:PSET(I,J):NEXT J:NEXT I
8950 IF LX$="s" OR LX$="S" THEN FOR I=8
TO 168 STEP 2:FOR J=8 TO 248 STEP 240/NX
:PSET(J,I):NEXT J:NEXT I
8960 IF DX$="s" OR DX$="S" THEN FOR I=0
TO DX-1:FOR J=1 TO 10 STEP SX:XX=I*240/D
X+240*LOG(J)/(LOG(10)*DX):FOR K=8 TO 168
 STEP 2:PSET(8+XX,K):NEXT K:NEXT J:NEXT
I
8970 RETURN
9000 REM DEFINICAO DE NR! (9010 A 9020)
9010 NR!=0
9100 REM DEFINICAO DE NR! (9110 A 9190)
9110 NI!=W!
9200 REM DEFINICAO DE DR! (9210 A 9290)
9210 DR!=1
9300 REM DEFINICAO DE DI! (9310 A 9390)
9310 DI!=W!
9400 RETURN
```

PROBLEMA EXEMPLO - Obter os diagramas de módulo e do ângulo de fase de Bode para o filtro passa-alta RC passivo de primeira ordem representado na figura 4.1.

Figura 4.1 - Filtro Passa Alta RC Passivo

FILTRO PASSA-ALTA RC

A tensão de saída do filtro é expressa por

VO(s)/VI(s) = R/(R+1/(s.C)) = s.R.C/(1+s.R.C)

que para s = j.w pode ser expresso por

VO(j.w)/VI(j.w) = j.w.R.C/(1+j.w.R.C)

Uma vez que não se dispõe dos valores de R e C a análise será realizada em função da freqüência normalizada.

wo = 1/(R.C)

VO(j.w/wo)/VI(j.w/wo) = j.w/wo/(1+j.w/wo)

As partes real e imaginária do numerador e do denominador podem ser definidas no programa, nos segmentos reservados para este propósito, como

```
9010 NR!=0
9110 NI!=W!
9210 DR!=1
9310 DI!=W!
```

O programa listado já inclui as linhas usadas neste exemplo. A introdução do comando RUN acarreta na solicitação dos ítens relacionados na figura 4.2 (o default e 15 - 1 - 1 para as cores e 1 para o passo de cálculo).

Na seqüência é definido o intervalo de análise. No exemplo utiliza-se o intervalo [0,1.wo , 10.wo]. A tela correspondente encontra-se representada na figura 4.3.

Figura 4.2 - Tela de Definição de Cores e Passo de Cálculo.

```
COR DO PRIMEIRO PLANO (01 A 15) ? 15
COR DO FUNDO ******** (01 A 15) ? 01
COR DA BORDA ******** (01 A 15) ? 01
PASSO DE CALCULO ****************
*** ( 1 / 2 / 4 / 8 / 12 / 24 ) ? 01 █
```

Figura 4.3 - Tela de Definição do Intervalo de Análise.

```
wmin - valor inicial de  w  para analise
wmax - valor  final  de  w  para analise

wmin = +1.00000E-01
wmax = +1.00000E+01

Menu Principal .................. <┘ ? █
```

Após a definição do intervalo de análise é apresentado o menu principal. A opção 5 (memorando auxiliar) resulta nas duas telas apresentadas nas figuras 4.4 e 4.5.

Após a apresentação do memorando auxiliar o programa retorna para o menu principal. A escolha da opção 1 (traçado do diagrama de módulo), a epecificação da referência para transposição como 0, das referências para para traçado do gráfico como -20 e 0 e a especificação para formatação gráfica como divisão horizontal em décadas, divisão vertival linear em 20 intervalos e inclusão de margeamento resultam nas telas e no diagrama apresentados nas figuras 4.6, 4.7 e 4.8.

A execução da opção de traçado do diagrama de fase é bastante semelhante e as telas e o diagrama correspondentes encontram-se representadas após as telas correspondentes aos diagramas de módulo, nas figuras 4.9 a 4.12.

Observação - comparar este problema com os problemas 9 e 14 do capítulo 2 - Análise Gráfica de Funções.

Figura 4.4 - Memorando Auxiliar - Tela 1

```
Analise dos Diagramas de Bode de
Modulo e de Fase a Partir de F(s)

F(S) = P(S) / Q(S)  onde para s = j*w

P(s) = NR  + j*NI                    e
Q(s) = DR  + j*DI

NR - Parte  real do numerador *******
NI - Parte  imaginaria do numerador *
DR - Parte  real do denominador *****
DI - Parte  imaginaria do denominador

NR! - linhas 9010 a 9090  NR! = f(W!)
NI! - linhas 9110 a 9190  NI! = f(W!)
DR! - linhas 9210 a 9290  DR! = f(W!)
DI! - linhas 9310 a 9320  DI! = f(W!)

Continuacao ....................... <┘ ? █
```

Figura 4.5 - Memorando Auxiliar - Tela 2

```
Controle de Tela  Grafica

        retorno
marcador    ▲    marcador
          ◄   ►
para esq    ▼    para dir
        proxima

Menu Principal ..... <┘ ? ■
```

Figura 4.6 - Especificações Para o Diagrama de Módulo.

```
Modulos  minimo  e  maximo
Gmin   =   -20.043 [ dB ]
Gmax   =    -0.043 [ dB ]

Referencia para transposicao
Gt     =    +0.000 [ dB ]
Gtmin  =   -20.043 [ dB ]
Gtmax  =    -0.043 [ dB ]

Referencias para  o  grafico
Gmin   =   -20.000 [ dB ]
Gmax   =    +0.000 [ dB ]
Tracado do diagrama  (s/n) ? ■
```

Figura 4.7 - Especificações Para Formatação Gráfica.

```
Formatacao  Para  Tracado dos Diagramas

Ha  2 decadas no intervalo  [xmin,xmax]
Divisao horizontal em decadas (s/n) ? s
Divisao   vertical linear      (s/n) ? s
Numero de intervalos       (1 a 20) ? 20
Margeamento                    (s/n) ? s
Confirmacao de especificacoes (s/n) ? █
```

Figura 4.8 - Diagrama de Módulo - Problema Exemplo

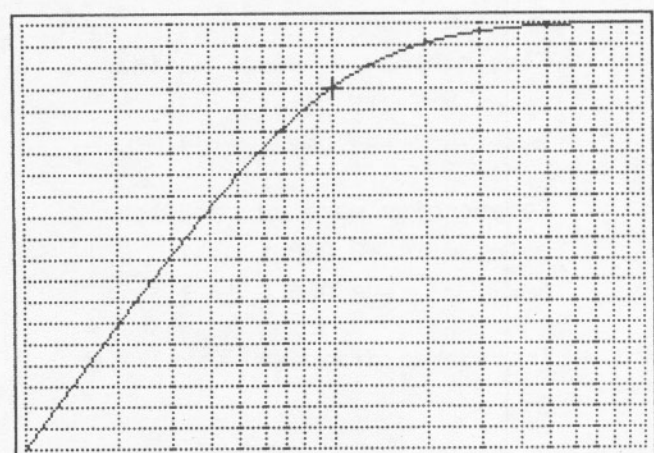



Figura 4.9 - Opções de Representação do Ângulo de Fase.

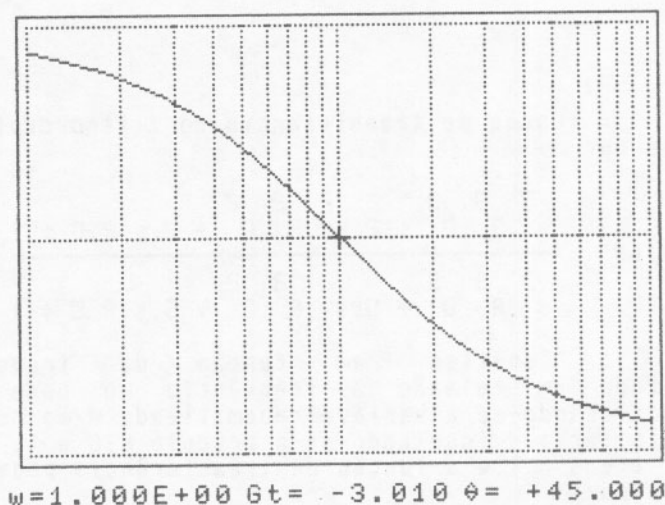
```
Angulo  de  fase - opcoes de
representacao angular ......

01 - Intervalo [+000°,+360°[
02 - Intervalo ]+000°,+360°]
03 - Intervalo [-180°,+180°[
04 - Intervalo ]-180°,+180°]
05 - Intervalo [-360°,-000°[
06 - Intervalo ]-360°,-000°]

Opcao .................. ? 4
```

Figura 4.10 - Especific. para o Diagrama do Ângulo de Fase.

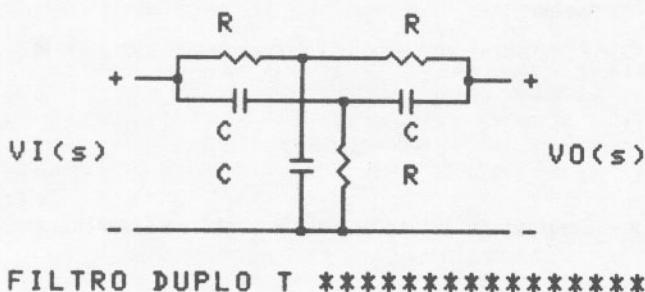
```
Fase minima  e  fase  maxima
θmin  =    +5.711 [  ° ]
θmax  =   +84.290 [  ° ]

Referencias para  o  grafico
θmin  =    +0.000 [  ° ]
θmax  =   +90.000 [  ° ]

Tracado do diagrama  (s/n) ? █
```

Figura 4.11 - Especificações Para Formatação Gráfica.

```
Formatacao  Para  Tracado dos Diagramas

Ha  2 decadas no intervalo  [xmin,xmax]
Divisao horizontal em decadas (s/n) ? S
Divisao   vertical linear     (s/n) ? S
Numero de intervalos        (1 a 20) ? 02
Margeamento                   (s/n) ? S
Confirmacao de especificacoes (s/n) ? █
```

Figura 4.12 - Diagrama do Ângulo de Fase - Problema Exemplo.

PROBLEMAS RESOLVIDOS

01 - O circuito duplo T representado na figura 4.13 atua como um filtro corta-faixa sintonizado em wo = 1/(R.C). Obter os diagramas de módulo e do ângulo de fase de Bode e pela análise dos diagramas obter as freqüências de corte e analisar o ângulo de fase em função da freqüência.

Figura 4.13 - Filtro Duplo T .

FILTRO DUPLO T ****************

A função de transferência do filtro duplo T é expressa por

$$VO(s)/VI(s) = \frac{s^3.R^3.C^3 + 2.s^2.R^2.C^2 + 2.s.R.C + 1}{s^3.R^3.C^3 + 5.s^2.R^2.C^2 + 5.s.R.C + 1}$$

A análise em função da frequencia normalizada em relação à freqüência wo pode ser realizada usando-se a variável normalizada w/wo ou, de modo mais fácil, igualando-se o produto R.C à 1. Para R.C = 1 e s = j.w a função de transferência pode ser expressa por

$$VO(j.w)/VI(j.w) = \frac{(-2.w^2 + 1) + j.(-w^3 + 2.w)}{(-5.w^2 + 1) + j.(-w^3 + 5.w)}$$

que pode ser definida a nível de programa nos segmentos reservados a este propósito como

```
9010 NR!=-2*W!^2+1
9110 NI!=-W!^3+2*W!
9210 DR!=-5*W!^2+1
9310 DI!=-W!^3+5*W!
```

O intervalo de análise será especificado como de uma década abaixo de wo a uma década acima de wo. Como wo = 1 (uma vez que 1/(R.C) = 1) o intervalo de w para analise resulta em [0,1 , 10].

A especificação do intervalo de representação do módulo como [-14 , +2] e a formatação gráfica especificada como 16 intervalos verticais resulta no diagrama apresentado na figura 4.14. Observe-se que esta especificação resulta em 1 dB por intervalo.

Observe-se que para freqüências muito baixas ou muito altas o módulo da função de transferência tende a 1. O valor mínimo do módulo é de -12,041 dB. O valor numérico correspondente é

$$10^{-12,041/20} = 0,250006$$

Para a determinação da freqüência de corte inferior verifica-se, com o auxílio do marcador de coordenadas, se há algum ponto no qual o módulo valha exatamente -3 dB. Uma vez que isto não se verifica determinam-se as coordendas dos pontos de módulo imediatamente abaixo e imediatamente acima deste valor e obtém-se o valor da freqüência de corte inferior por interpolação. As coordenadas dos pontos citados são

w = 0,2464	w1 = ?????	w = 0,2512
G = -2,936	G = -3,000	G = -3,023

cuja interpolação resulta em

Figura 4.14 - Diagrama de Módulo - Filtro Duplo T

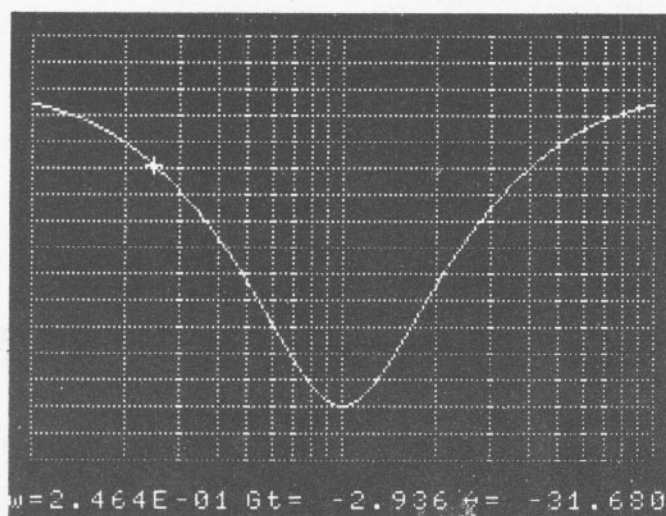
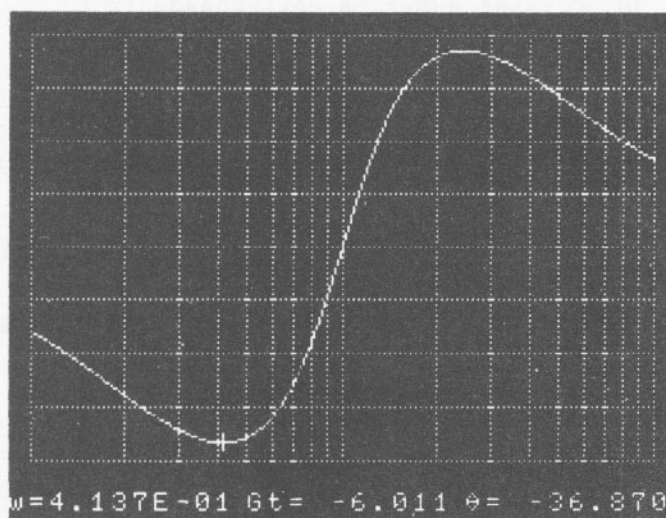



Figura 4.15 - Diagrama do Ang. de Fase - Filtro Duplo T .

$w1 = 0,2464 + (-3,000-(2,936)) . (0,2512 - 0,2464) / (-3,023-(-2,936))$

$w1 = 0,2499$

Procedendo-se de modo semelhante para w2 obtém-se

w = 3,981	w2 = ??????	w = 4,058
G = -3,023	G = -3,000	G = -2,936

cuja interpolação resulta em

$w2 = 3,981 + (-3,000-(3,023)) . (4.058 - 3,981) / (-2,936-(-3,023))$

$w2 = 4,001$

Observe-se que para a média geométrica das freqüências de corte w1 e w2 resulta na freqüência de ressonância do filtro.

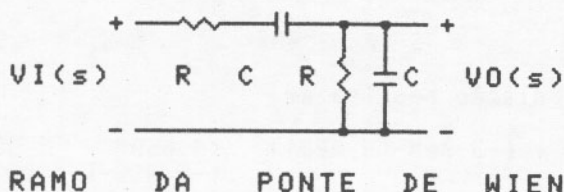
w1.w2 = 0,9999 = 1 (w normalizada em relação a w0)

As especifições para o enquadramento do ângulo de fase no intervalo] -180 , + 180], intervalo de representação do módulo (referências para o gráfico) como [-40, +40], divisão horizontal em décadas e divisão vertical em 08 intervalos lineares resultam no diagrama apresentado na figura 4.15. Observe-se que o ângulo de fase tende a zero graus a medida que w se aproxima de zero ou de infinito e que na freqüência de ressonância este valor tambem é nulo.

A verificação dos valores do ângulo de fase através do marcador de coordenadas permite a verificação das coordenadas dos pontos de mínimo e de máximo. O ponto de mínimo ocorre para w = 0,4317, que resulta no ângulo de fase -36,879 graus, e o ponto de máximo ocorre para w = 2,417, que resulta no ângulo de fase +36,879 graus.

02 - O ramo da Ponte de Wien apresentado na figura 4.16 é comumente utilizado como elo de realimentação em osciladores senoidais (principalmente para geradores de áudio). Analisar os diagramas de módulo e de fase e comprovar que na freqüência de ressonância wo = 1/(R.C)

o defasamento entre a tensão de saída e a tensão de entrada é nulo (para tensão alternada de formato sinusoidal) e que nesta condição o módulo de Vo/Vi é igual a 1/3.

Figura 4.16 - Ramo da Ponte de Wien.

A função de transferência do ramo da Ponte de Wien apresentado é expressa por

$$VO(s)/VI(s) = \frac{s.R.C}{s^2.R^2.C^2 + 3.s.R.C + 1}$$

que para o produto R.C = 1 (que equivale a normalização de w em relação à wo com wo = 1/(R.C)) e s = j.w pode ser expressa por

$$VO(j.w)/VI(j.w) = \frac{j.w}{(-w^2 + 1) + j.3.w}$$

que pode ser definida nos segmentos de programa reservados a este propósito por

```
9010 NR!=0
9110 NI!=W!
9210 DR!=-W!^2+1
9310 DI!=3*W!
```

Especificando-se o intervalo de análise como [0.1 , 10] , a referência para transposição do módulo

Figura 4.17 - Diagrama de Módulo - Ramo da Ponte de Wien.

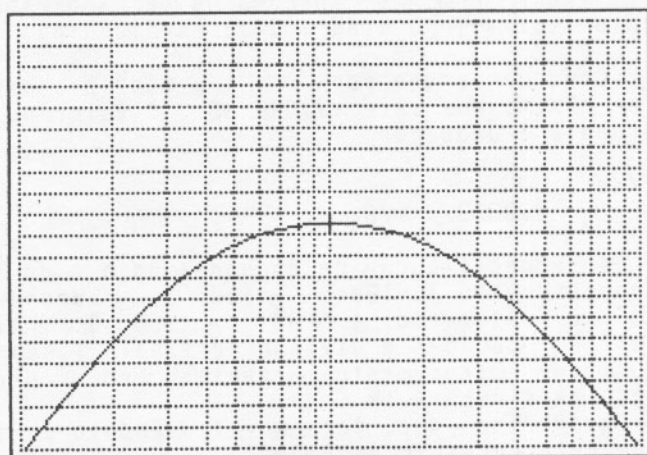
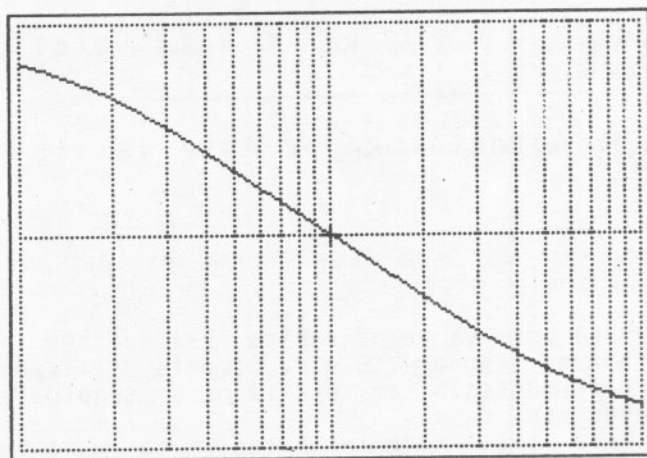



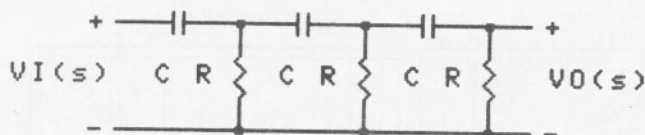
Figura 4.18 - Diagrama de Fase - Ramo da Ponte de Wien.

como 0, o intervalo de representação do módulo como [-20 , 0], divisão horizontal em décadas, divisão vertical linear com 20 intervalos e inclusão de margeamento obtém-se o diagrama apresentado na figura 4.17.

Observe-se que para w = 1 o módulo apresenta seu valor máximo que vale -9,542 dB. O valor numérico correspondente é dado por

$$10^{-9,542/20} = 0,3333 = 1/3$$

A especificação de enquadramento do ângulo de fase no intervalo] -180 , + 180], representação (gráfico) no intervalo [-90 , +90], divisão horizontal em décadas e divisão vertical linear com inclusão de margeamento resulta no diagrama apresentado na figura 4.18 .

Observe-se que para w = 1 o ângulo de fase é nulo e que esta condição é única.

Figura 4.19 - Rede RC de Avanço de Fase de Três Seções.

03 - A rede passiva de avanço de fase de três seções representada na figura 4.19 é comumente utilizada como elo de realimentação em osciladores senoidais por deslocamento de fase.

Para tal a estrutura atua em conjunto com um amplificador inversor. Nestas condições a rede apresenta um defasamento entre as tensões de entrada e

saída de 180 graus que complementados pelos 180 graus de defasagem do amplificador inversor resultam nos 360 graus (ou múltiplos inteiros deste valor) que o sistema de malha fechada deve apresentar como uma das condições de oscilação. A outra condição para a ocorrência de oscilação é que o módulo do ganho do amplificador seja o recíproco do módulo do ganho do elo de realimentação. Com o auxílio dos diagramas de Bode determinar a freqüência na qual ocorre o defasamento especificado e o módulo do ganho correspondente.

A função de transferência da rede de avanço de fase apresentada é expressa por

$$VO(s)/VI(s) = \frac{s^3.R^3.C^3}{s^3.R^3.C^3 + s^2.6.R^2.C^2 + S.5.R.C + 1}$$

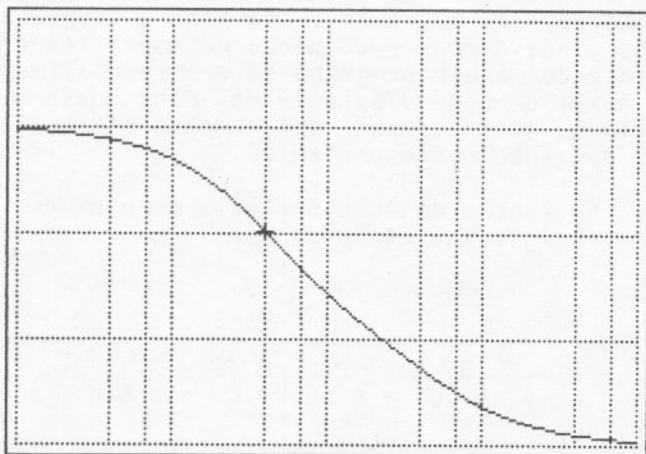
que pode ser apresentada em função da freqüência normalizada wo = 1/(R.C)) ou de modo mais fácil igualando-se o produto R.C a 1. Desta maneira (R.C = 1) e fazendo-se s = j.w tem-se

$$VO(j.w)/VI(j.w) = \frac{-j.w^3}{(-w^2.6 + 1) + j.(-w^3 + 5)}$$

que pode ser definida no programa por

```
9010 NR!=0
9110 NI!=-W!^3
9210 DR!=-W!^2*6+1
9310 DI!=-W!^3+5*W!
```

A especificação do intervalo de análise como [0,01 , 100], enquadramento do ângulo de fase no intervalo [0 , 360] , representação (gráfico) no intervalo [0 , 360] , divisão horizontal em décadas , divisão vertical em 4 intervalos e inclusão de margeamento resulta no diagrama apresentado na figura 4.20 . Observe-se que cada intervalo vertical corresponde a 90 graus.

Figura 4.20 - Diagrama do Angulo de Fase - Problema 3 .

w=3.981E-01 Gt=-29.702 θ=+181.458

A verificação das coordenadas que definem o diagrama não fornece nenhum valor de w cujo ângulo de fase resulte em +180 graus, de modo que obtemos este valor por interpolação. O módulo e o angulo de fase procurado situam-se entre os pontos de coordenadas apresentadas

w = 0,3981	w = ??????	w = 0,4137
θ = 181,458	θ = 180,000	θ = 179,232

cuja interpolação resulta em

w = 0,3981 + (180,000-181,458).(0,4137 - 0,3981) / (179,232-181,458)

w = 0,4083

A conferência do resultado através da opção de cálculo de valores particulares resulta em um ângulo da fase de 179,993 para o valor de w acima.

A solução exata deste problema é

$w = 1/(\sqrt{6}.R.C) = 0,408248.R.C$ (neste exercício R.C = 1)

O módulo e ângulo de fase correspondentes a este valor de w são

$G = -29,248$ dB $\qquad \theta = +180,000$

O módulo expresso numericamente resulta em

$$10^{-29,248/20} = 0,0344826$$

O ganho do amplificador deve apresentar o valor

$1/0,0344826 = 29,0001$

04 - Durante a análise da resposta em baixa frequência de um amplificador verifica-se que o mesmo possui pólos simples nas frequências de 333 e 599 rad/s. Determinar a frequência de corte exata e compara-la com a obtida pelo método aproximado.

A função de transferência do amplificador pode ser expressa na região de baixas frequências por

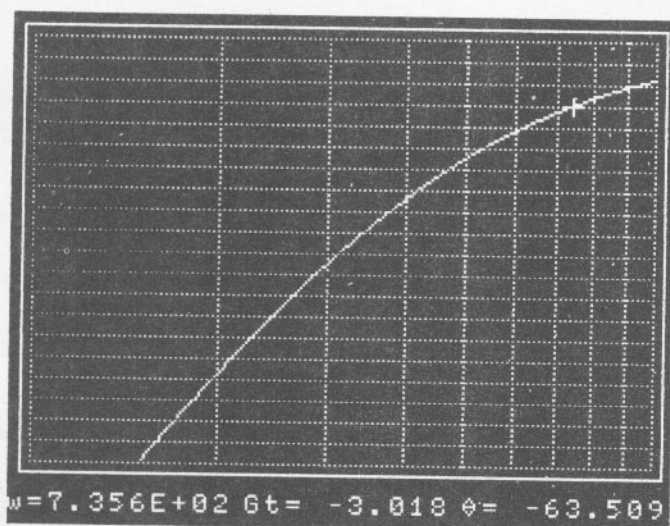
$$Av(s) = Ao \cdot \frac{s}{s + 333} \cdot \frac{s}{s + 599}$$

que para Ao = 1 e s = j.w resulta em

$$Av(j.w) = \frac{-w^2}{(-w^2 + 199467) + j.(w.932)}$$

que pode ser expresso nos segmentos de programa reservados a este propósito por

```
9010 NR!=-W!^2
9110 NI!=0
9210 DR!=-W!^2+199467
9310 DI!=-W!*932
```

Figura 4.21 - Diagrama de Módulo - Problema 4 .

Especificando-se o intervalo de análise como [100 , 1000], a referência para transposição do módulo como 0, o intervalo de representação do módulo como [-20 , 0], divisão horizontal em décadas, divisão vertical linear com 20 intervalos e inclusão de margeamento obtém-se o diagrama apresentado na figura 4.21 . Observe-se que esta formatação resulta em 1 dB por intervalo.

Para determinação da frequência de corte procura-se o valor de w que resulta no módulo de -3 dB (uma vez que o ganho na região de medias frequências - Ao - foi assumido como unitário (0 dB)). As coordenadas indicadas pelo marcador não apontam diretamente este valor, que será obtido por interpolação. O valor da frequência de corte e do módulo -3 dB estão situados entre os pontos de coordenadas

w = 735,6	w1 = ??????	w = 742,7
G = -3,018	G = -3.000	G = -2,917

cuja interpolação resulta em

w = 735,5 + (-3,000-(-3,018).(742,7 - 735,6) /
(-2,917-(-3,018))

w = 738,3

O valor obtido pelo método aproximado consiste na soma destes dois valores dos pólos de baixa frequência que resulta em 932 rad/s. Observe-se que o erro introduzido por este método (somatório) é razoável e neste caso resulta em

(932-738,3)/738,3 = 0,262359 = 26,2359 por cento

OBSERVAÇÃO - Comparar a solução através deste método com a solução apresentada no exemplo 5.7 do livro CIRCUITOS ELETRÔNICOS - Volnei A. Pedroni - LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

05 - Determinar analiticamente a curva de resposta em frequência do equalizador RIAA representado na figura 4.22 e compará-la com a curva padrão apresentada na figura 4.23 . A referência para transposição do módulo do ganho e o ganho na frequência 1 kHz. Efetuar a análise em função da frequência em Hz.

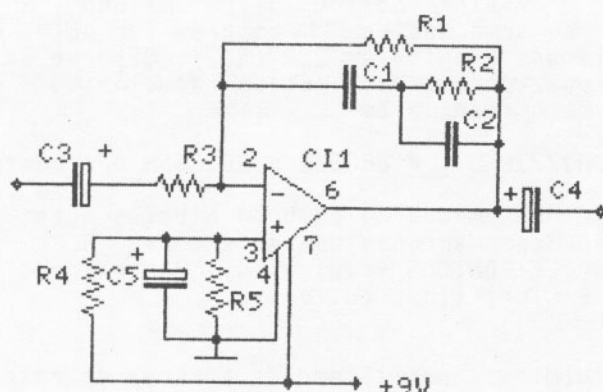
O circuito consiste basicamente de um amplficador operacional configurado como amplificador inversor. Os resistores R4 e R5 e o capacitor C5 formam um divisor de tensão para permitir a atuação do amplificador operacional a partir de fonte simples. O capacitor C5 tem por função a filtragem de ruídos de fonte. A influência dos capacitores de acoplamento C3 e C4 e desprezível na faixa de frequência em que opera o equalizador. O ganho do amplificador operacional configurado como amplificador inversor é dado por

Av = -Z2/Z1

sendo Z2 a impedância entre a saída e a entrada inversora e Z1 a impedância entre a entrada inversora e a entrada do amplificador. Analisando-se estas impedâncias no domínio da frequência complexa s tem-se

Z1(s) = R3

Z2(s) = R1//(1/(s.C1)+R2//(1/(s.C2))

Figura 4.22 - Equalizador RIAA para Cápsula Magnética.

$$R2 \; // \; \frac{1}{s.C2} = \frac{R2}{s.R2.C2+1}$$

$$\frac{1}{s.C2} + \frac{R2}{s.R2.C2+1} = \frac{s.R2.(C1+C2)+1}{s.C1.(s.R2.C2+1)}$$

$$\frac{1}{Z2(s)} = \frac{1}{R1} + \frac{s.R2.(C1+C2)+1}{s.C1.(s.R2.C2+1)}$$

$$Z2(s) = \frac{s^2.R1.R2.C1.C2 + s.(R1.C1+R2.(C1+C2)) + 1}{s.R2.(C1+C2) + 1}$$

$$Av(s) = -Z2(s)/Z1(s)$$

$$Av(s) = \frac{-R1}{R3} \cdot \frac{s^2.R1.R2.C1.C2 + s.(R1.C1+R2.(C1+C2)) + 1}{s.R2.(C1+C2) + 1}$$

que para s = j.w pode ser expresso por

$$Av(j.w) = \frac{(-R1/R3) + j.w.(-R1/R3).R2.(C1+C2)}{(-w^2.R1.R2.C1.C2+1) + j.w.(R1.C1+R2.(C1+C2))}$$

A definiçãa desta função nos segmentos de programa reservados a este propósito pode ser feita por

```
520 R1!=39000
530 R2!=3300
540 R3!=3300
550 C1!=1E-07
560 C2!=2.2E-08

9010 WW!=2*PI!*W!
9020 NR!=-R1!/R3!
9110 NI!=WW!*(-R1!/R3!)*R2!*(C1!+C2!)
9210 DR!=-WW!^2*R1!*R2!*C1!*C2!+1
9310 DI!=WW!*(R1!*C1!+R2!*(C1!+C2!))
```

A definição desta função nos segmentos de realizado no segmento de programa reservado a definição de contantes e funções (linhas 510 a 990) de modo a facilitar a expressão da função de transferência. Na função de transferência utiliza-se neste caso a variável WW! para representação da frequência em rad/s, uma vez que a variável W! está representando a frequência em Hz. A transformação da frequência em Hz para rad/s é executada pela linhas 9010 a cada vez que se acessa a sub-rotina de definição das partes reais e imaginária de P(s) e Q(s) (linhas 9000 a 9400).

O módulo do ganho de um equalizador RIAA é sempre referenciado (tansposto) em relação ao módulo do ganho correspondente a frequência de 1 kHz. Verificando-se este valor através da opção de cálculo de valores particulares obtém-se G = 0,929 dB.

Especificando-se o intervalo de análise como [10 , 10000], a referência para transposição do módulo como 0,929 , o intervalo de representação do módulo como [-25 , +25], divisão horizontal em décadas, divisão vertical linear com 10 intervalos e inclusão de margeamento obtém-se o diagrama apresentado na figura 4.24 . Observe-se que esta formatação resulta igual a da curva de resposta mostrada na figura 4.23 .

Figura 4.23 - Curva de Resposta do Padrão RIAA (Reprodução).

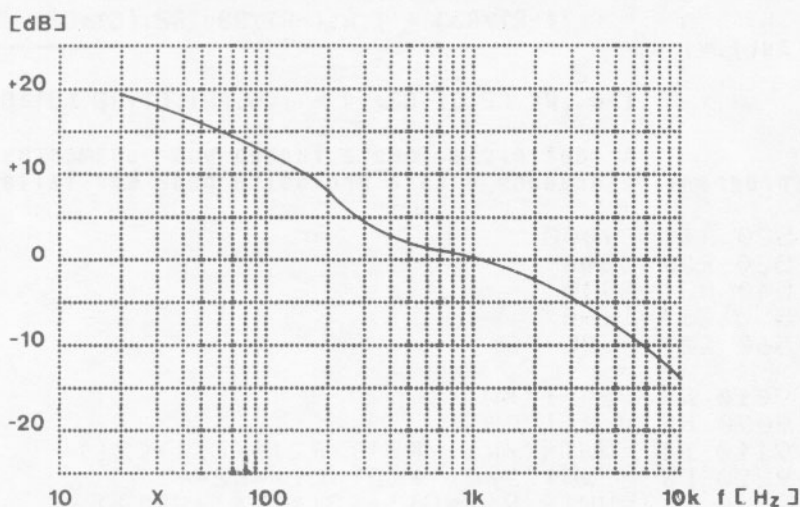
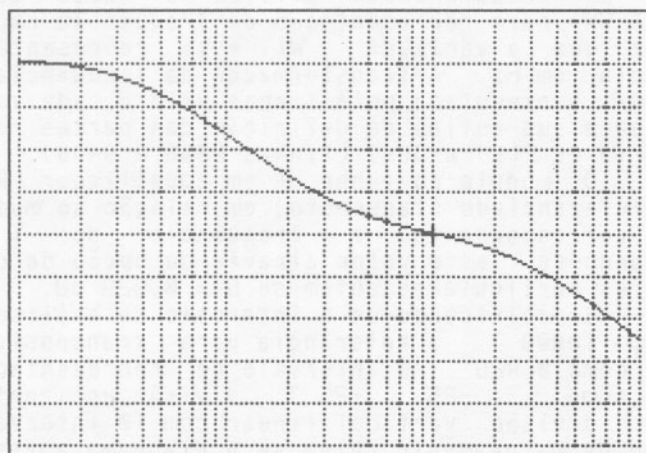



Figura 4.24 - Diagrama de Módulo do Equalizador RIAA (Reprodução).

06 - Analisar a inclinação do diagrama de módulo do filtro passa-baixa correspondente a função de transferência apresentada.

$$R(s) = \frac{s}{s + 10} \cdot \frac{s}{s + 100}$$

Colocando-se a equação apresentada na forma polinomial e fazendo-se s = j.w, tem-se

$$R(s) = \frac{s^2}{s^2 + 110.s + 1000}$$

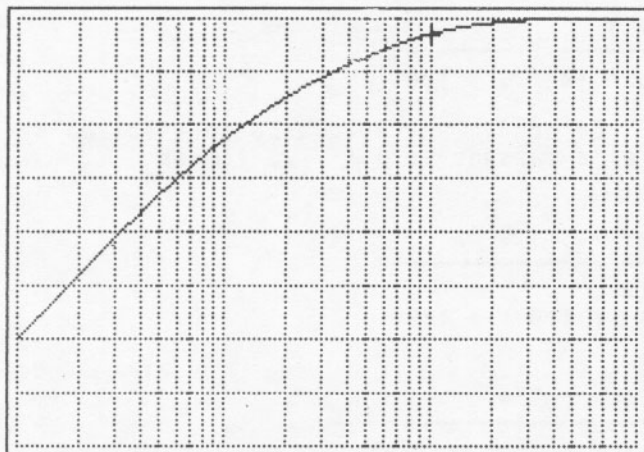
$$R(s) = \frac{-w^2}{(-w^2 + 1000) + j.w.110}$$

cuja definição a nível de programa pode ser realizada por

```
9010 NR!=-W!^2
9110 NI!=0
9210 DR!=-W!^2+1000
9310 DI!=W!*110
```

Especificando-se o intervalo de análise como [1 , 1000], a referência para transposição do módulo como 0 , o intervalo de representação do módulo como [-80 , 0], divisão horizontal em décadas, divisão vertical linear com 8 intervalos e inclusão de margeamento obtem-se o diagrama apresentado na figura 4.25 .

Observe-se que a inclinação entre w = 1 e w = 10 é de aproximadamente 40 dB por década e que entre w = 10 e w = 100 é de aproximadamdemte 20 dB por década. A frequência de corte é aproximadamente 100, o que é razoável, uma vez que os pólos estão bastante distantes entre si.

Figura 4.25 - Diagrama de Módulo - Problema 6 .

ω=1.000E+02 Gt= -3.054 θ= +50.711

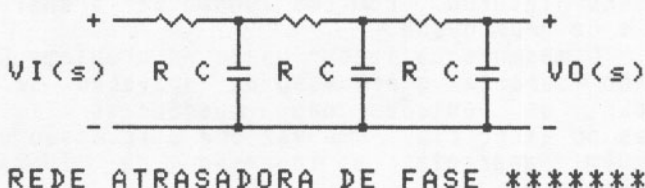
PROBLEMAS PROPOSTOS

07 - A troca de posições do resistor e do capacitor do filtro passa-alta RC passivo de primeira ordem apresentado no problema exemplo resulta no filtro passa-alta correspondente. Refazer o problema exemplo para o filtro passa-alta resultante usando os mesmos procedimentos e especificações. A função de transferência resultante é

VO(s)/VI(s) = 1/(s.R.C + 1)

VO(j.w)/VI(j.w) = 1/(1 + j.w.R.C)

OBSERVAÇÕES - O acerto da resposta é evidente pela semelhança dos diagramas obtidos com os do problema exemplo. Comparar este problema com os problemas 9 e 14 do capítulo 2 - Análise Gráfica de Funções.

Figura 4.26 - Rede RC de Atraso de Fase de Três Seções.

08 - A permuta dos resistores com os capacitores no problema 03 resulta na rede de atraso de fase apresentada na figura 4.26 . Esta estrutura possui função de transferência expressa por

$$VO(s)/VI(s) = \frac{1}{s^3.R^3.C^3 + s^2.5.R^2.C^2 + S.6.R.C + 1}$$

Seguindo a mesma sequência de análise do problema 03 obter a frequência e o módulo correspondentes a um defasamento -180 graus entre as tensões de saída e de entrada. Como a rede obtida é de atraso de fase enquadrar o ângulo de fase no intervalo [-360 , +000].

RESPOSTA - A solução exata é $w = \sqrt{6} / R.C$. O módulo é idêntico ao obtido no problema 03.

09 - Determinar a frequência de corte de um amplificador que possua pólos de baixa frequência em 100 e 200 rad/s e comparar este resultado com o obtido pelo método aproximado (somatório).

RESPOSTA - 239,3 rad/s e 300 rad/s (aproximada).

OBSERVAÇÃO - A sequência de análise é idêntica à do problema 6 .

10 - O equalizador RIAA proposto no problema 05 destinava-se a correção do sinal obtido por uma cápsula magnética de um toca-discos durante o processo de reprodução. Durante o processo de gravação é executado o processo inverso, com uma função de transferência inversa a de reprodução.

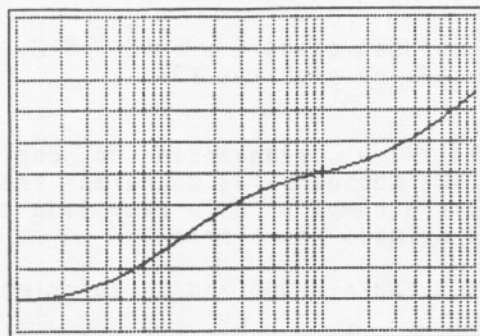
O mesmo equalizador usado no problema 5 pode ser usado durante o processo de gravação se forem invertidas as posições das impedâncias Z1 e Z2 indicadas no exercício, uma vez que a inversão de Z1 e Z2 também acarreta a inversão da função de transferência.

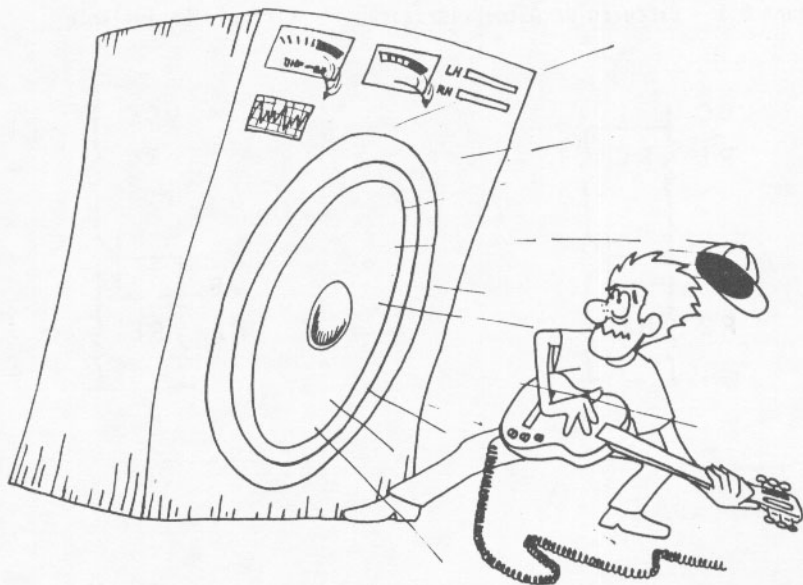
Usando a mesma sequência de análise do problema 5 analisar o comportamento que teria este circuito quando operando como um equalizador RIAA para gravação.

A função de transferência resultante da inversão da função de transferência do problema 5 é

$$Av(s) = \frac{-R3}{R1} \cdot \frac{s.R2.(C1+C2) + 1}{s^2.R1.R2.C1.C2 + s.(R1.C1+R2.(C1+C2)) + 1}$$

OBSERVAÇÃO - A referência para transposição continua sendo o ganho em 1 kHz (obviamente da função de transferência acima). A resposta encontra-se abaixo.

Figura 4.27 - Diagrama de Módulo do Equalizador RIAA (Gravação).

CAP. 5

Amplificadores Básicos

AMPLIFICADORES BÁSICOS

RESUMO DA TEORIA

POLARIZAÇÃO DE TRANSISTOR BIPOLAR

No circuito da figura 5.1 o comportamento do ponto de operação (VCE, IC) do transistor bipolar é descrito por:

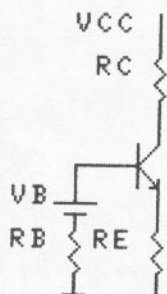
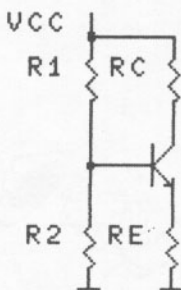
$$VCC = RC.IC + VCE + RE.IE$$

A partir do circuito equivalente apresentado em conjunto com o circuito de auto-polarização pode-se afirmar que:

$$VB = RB.IB + VBE + RE.IE$$

O comportamento do transistor bipolar pode ser descrito por:

$$IC = \beta.IB + (\beta+1).ICBO \qquad IE = IC + IB = (\beta+1).(IB+ICBO)$$

Figura 5.1 - Circuito de Auto-Polarizacão   Circuito Equivalente

$$VB = VCC.R2/(R1+R2) \qquad RB = R1//R2$$

A substituição de IE na equação de VB permite descrever o comportamento de IC em função de ICBO, VBE e B como se segue:

$$IC = \beta.(VB-VBE-(\beta+1).ICBO.RE)/(RB+(\beta+1).RE)+(\beta+1).ICBO$$

e o valor de VCE pode então ser descrito por:

$$VCE = VCC - (RC+RE).IC$$

onde se considerou IC = IE, o que não introduz erro apreciável.

O valor de corrente de coletor pode então ser facilmente determinado no caso de alteração de qualquer um dos parâmetros envolvidos, ou mesmo para o caso de alterações simultâneas em mais de um parâmetro.

Contudo, é de grande interesse prático a determinação das variações de IC em função das variações de ICBO, VBE e β separadamente. Isto é feito através dos fatores de estabilidade S, S' e S'', sendo:

$S = dIC/dICBO$ considerando-se VBE e β constantes

$S' = dIC/dVBE$ considerando-se ICBO e β constantes

$S'' = dIC/d\beta$ considerando-se ICBO e VBE constantes

As variações de IC devido a cada uma das variações de ICBO. VBE e B são dadas por:

$\Delta IC(ICBO) = S.\Delta ICBO$ $\Delta IC(\Delta VBE) = S'.\Delta VBE$

$\Delta IC(DB) = S''.\Delta\beta$

A variação total de IC é dada por:

$$\Delta IC = \Delta IC(DICBO) + \Delta IC(DVBE) + \Delta IC(DB)$$

Para o circuito em análise, partindo-se de uma situação inicial 1 para uma situação final 2, tem-se:

$S = \beta 1.(RB+RE)/(RE+\beta 1.RE)$ $\Delta ICBO = ICBO2 - ICBO1$

$S' = -\beta 1/(RB+\beta 1.RE)$ $\Delta VBE = VBE2 - VBE1$

$S'' = IC1.RB/(\beta1.(RB+\beta2.RE))$ $\Delta\beta = \beta2 - \beta1$

$\Delta IC = IC2 - IC1$

A análise da variação de IC em função das variações de ICBO, VBE e β, individualmente, não é exata, pois S, S' e S'' são derivadas parciais definidas em torno de um ponto. Contudo o erro introduzido é pequeno. A vantagem deste método de análise, conforme mencionado anteriormente, consiste na determinação de quanto cada uma das variações individuais de ICBO, VBE e β contribui para a variação total de IC, o que permite o estudo de um método de compensação das variações de IC adequado.

Observe-se que os valores ideais de S, S' e S'' são nulos. Em termos práticos, quanto menor a relação RB/RE menores serão estes fatores e melhor a estabilidade do circuito. Porém RB não pode ser reduzido indefinidamente, o que compromete o consumo e (em alguns amplificadores) a impedância de entrada.

POLARIZAÇÃO DE TRASISTOR DE EFEITO DE CAMPO TIPO JFET

No circuito da figura 5.2 o comportamento do ponto de operação (VDS, ID) do JFET é descrito por:

$VDD = (RS+RD).ID + VDS$ e $VG = VGS + RS.ID$

O comportamento CC do JFET pode ser descrito por:

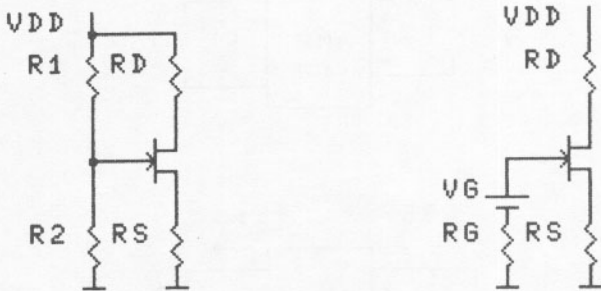
$ID = IDS = IDSS.(1-VGS/VP)^2$ para $VDS > VDSS = VGS - VP$

O ponto de operação é determinado simultaneamente pelos componentes do circuito e pelas características do transistor, ou seja, deve atender simultaneamente as equações:

$VG = VGS + RS.ID$

$ID = IDSS.(1-VGS/VP)^2$

A solução deste sistema de equações pode ser generalizada através de uma equação do segundo grau em ID expressa por:

Figura 5.2 - Circuito de Auto-Polarização Circuito Equivalente.

$$(RS/VP^2).ID^2+(2.(VP-VG).RS/VP^2-1/IDSS).ID+((VP-VG)/VG)^2 = 0$$

ou em VGS expressa por:

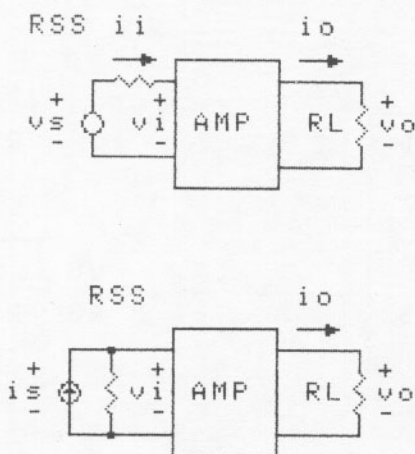
$$(1/VP^2).VGS^2+(1/(RS.IDSS)-2/VP).VGS+(1-VGS/(RS.IDSS)) = 0$$

As raízes destas equações geram duas trias de valores: VGS', ID', VDS' e VGS'', ID'', VDS''. A solução do sistema será a tria de valores coerente com as características do transistor.

A determinação do ponto de operação e de desvios no mesmo pode ser feita a partir da equação, uma vez que qualquer alteração nos parâmetros do circuito ou do transistor resulta na alteração dos coeficientes da equação.

PARÂMETROS DE AMPLIFICADORES

Os ganhos de tensão (Av), corrente (Ai), transimpedância (Az) e transadmitância (Ay), referidos

Figura 5.3 - Tensões e Correntes em um Amplificador.

a tensão e corrente existentes na entrada de amplificador (ver figura 5.3) são definidos como:

Av = vo/vi [1] Ai = io/ii [1]

Az = vo/ii [ohm] Ay = io/vi [S]

Referindo-se estes mesmos parâmetros à tensão e corrente fornecidas pela fonte de excitação tem-se:

Avs = vo/vs [1] Ais = io/is [1]

Azs = vo/is [ohm] Ays = io/vs [S]

Observe-se que vs é a tensão fornecida pela fonte de excitação com seus terminais em aberto e que a is é a corrente fornecida pela fonte de excitação com seus terminais em curto e que estes valores, de modo geral, são diferentes de vs e is. Os ganhos definidos com índice s descrevem também o carregamento a que está submetida a fonte de excitação por parte do circuito.

As impedâncias de entrada e saída são determinadas pela razão entre a tensão aplicada (v) aos

terminais de interesse e a corrente desenvolvida (i). Para isto as fontes de excitação são substituídas pelas respectivas impedâncias internas.

Demonstra-se que os ganhos definidos anteriormente e as impedâncias de entradas e saída se relacionam do seguinte modo:

Av = Av　　　　　Avs = Av.zi/(zi+RSS)

Ai = (zi/RL).Av　　　　　Ais = (RSS/RL).Avs

Az = zi.Av　　　　　Azs = RSS.Avs

Ay = Av/RL　　　　　Ays = Avs/RL

Observe-se que conhecendo-se a impedância da fonte de excitação (RSS), a impedância da carga (RL), a impedância de entrada (zi), a impedância de saída (zo) e o ganho de tensão (Av), é possível a determinação dos demais ganhos.

O comportamento do transistor dentro de um amplificador é adequadamente descrito pelas retas de carga CC e CA. A reta de carga CC é o lugar geométrico de todos os pontos de operação possíveis (VCE e IC para transistor bipolar e VDS e ID para transistores de efeito de campo). A reta de carga CA é o mesmo conceito aplicado aos valores instantâneos totais (vCE e iC para transistor bipolar e vDS e e iD para transistor de efeito de campo).

Uma vez determinadas as retas de carga é possível a determinação da máxima e da mínima tensão (vomax e vomin) que o amplificador pode fornecer a uma determinada carga, que também são denominadas de excursões de sinal. A excursão de sinal do amplificador é a diferença destes dois valores e, no caso de um sinal de valor máximo e mínimo iguais (em módulo) é duas vezes o menor dos módulos das duas excursões de sinal (vomax e vomin).

As excursões de sinal dependem do ponto de operação. Para cada amplificador pode-se efetuar a determinação de um ponto de operação que forneça a máxima excursão de sinal possível (no caso de excursão de sinal simétrica na saída). A condição de máxima excursão de sinal pode ser obtidas analiticamente igualando-se os módulos de vomax e vomin, o que resulta em:

vomax = -vomin $\longrightarrow$ máxima excursão de sinal

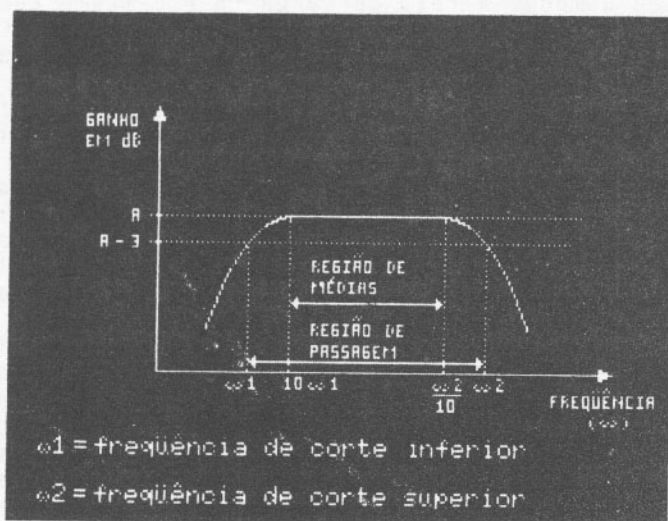
uma vez que vomax é um valor positivo e vomin um valor negativo.

A curva de resposta em frequência de um amplificador possui o aspecto geral apresentado na figura 5.4 . A região em que o ganho é praticamente independente da frequência é denominada região de médias frequências. As frequências abaixo e acima desta região nas quais o ganho cai a 0,707 vezes o ganho na região de médias frequências (ou -3 dB se o ganho for expresso em dB) são designadas, respectivamente, de frequência de corte inferior (f1) e frequência de corte superior (f2). A faixa de passagem do amplificador é:

BW = f2 - f1

e a frequência central a média geométrica das duas frequências de corte, ou seja:

frequência central = f1.f2

Figura 5.4 - Curva de Resposta em Frequência.

A frequência de corte inferior de um amplificador básico é determinada pelas capacitâncias externas (ao transístor) e a frequência de corte superior pelas capacitâncias internas (ao transistor).

O cálculo da frequência de corte inferior é feito obtendo-se a resistência equivalente para cada capacitor quando os demais são considerados infinitos (curto-circuitos). Cada par de valores resistência equivalente - capacitor considerado determina um pólo de valor:

p = 1/(2.PI.Req.C) [Hz]   p = 1/(Req.C) [rad/s]

Se, em um amplificador, o maior dos pólos assim obtidos for cerca de 10 vezes maior que o pólo imediatamente inferior, ele representa a frequência de corte inferior do amplificador. Se isto n ao ocorrer, a frequência de corte inferior será, aproximadamente, a somatória dos valores de todos os pólos do amplificador.

OBSERVAÇÃO - Este processo é genérico. Em alguns casos dois capacitores podem determinar um único pólo (CI e CB na configuração base-comum) e em outros não possuir influência significativa (CG na configuração porta-comum). Para maiores detalhes verificar o livro Circuitos Eletrônicos - Volnei A. Pedroni - LTC Livros Ténicos e Científicos Editora S.A. no item Resposta em baixa frequência do circuito base-comum e Resposta em baixa frequência do circuito porta-comum, no capítulo de número 5 - Amplificadores Básicos.

A frequência de corte superior é de determinação mais complexa e não será resumido aqui seu processo de obtenção. Para maiores detalhes aconselha-se a consulta a obra referida.

AMPLIFICADORES BÁSICOS

Nas figuras 5.5 a 5.11 são representados os sete amplificadores básicos analisados no programa e as fórmulas que descrevem o seu comportamento. Observe-se que a impedância da fonte de excitação foi designada de RSS tanto para o transistor bipolar como para o de efeito de campo.

Figura 5.5 - Emissor Comum. Figura 5.6 - Coletor Comum.

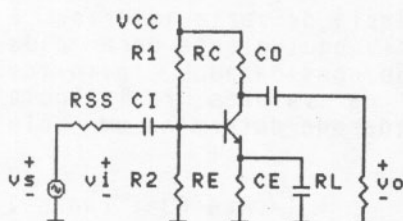
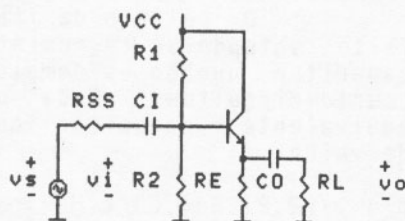



Figura 5.7 - Base Comum. Figura 5.8 - Emissor Comum Realimentado.

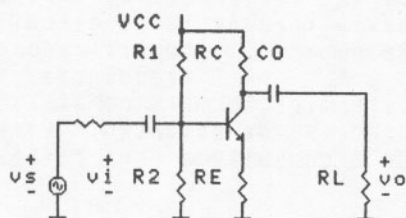
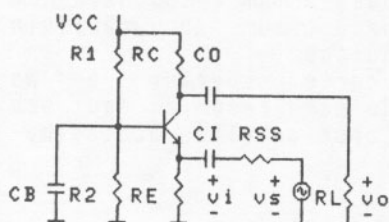



Figura 5.9 - Fonte comum.

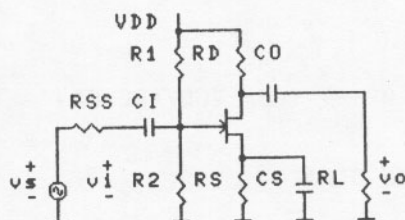



Figura 5.10 - Dreno Comum.

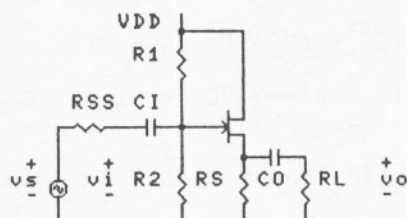
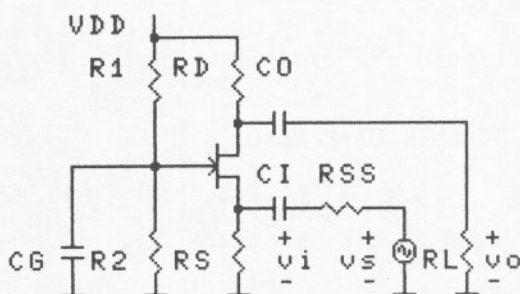



Figura 5.11 - Porta comum.

AMPLIFICADOR CONFIGURAÇÃO EMISSOR COMUM

RETA DE CARGA CC

VCC = (RC+RE).IC + VCE

IC = 0 ⟶ VCE = VCC   VCE = 0 ⟶ IC = VCC/(RC+RE)

RETA DE CARGA CA E EXCURSÕES DE SINAL

VCC = RC.iC + (RC/RL+1).vCE - RC/RL.VCE + RE.IC

iC = 0 ⟶ vCE = VCE + RC//RL.IC

vCE = 0 ⟶ iC = IC + VCE/(RC//RL)

vomax = RC//RL.IC

vomin = VCEsat - VCE

PONTO DE OPERACAO PARA MÁXIMA EXCURSÃO DE SINAL

IC = (VCC-VCEsat)/(RC+RE+RC//RL)

GANHO DE TENSÃO

Av = -(hfe.(1/hoe)//RL')/hie   RL' = RC//RL

IMPEDÂNCIAS DE ENTRADA E SAÍDA

zi = RB//hie   RB = R1//R2

zo = (1/hoe)//RC

RESISTÊNCIAS EQUIVALENTES

ReqI = zi + RSS   ReqO = zo + RL

ReqE = RE//((hie+RB//RSS)/(hfe+1))

AMPLIFICADOR CONFIGURAÇÃO COLETOR COMUM

RETA DE CARGA CC

VCC = RE.IC + VCE

IC = 0 ⟶ VCE = VCC   VCE = 0 ⟶ IC = VCC/RE

RETA DE CARGA CA E EXCURSÕES DE SINAL

VCC = vCE + RE//RL.iC + (RE-RE//RL).IC

iC = 0 ⟶ vCE = VCE + RE//RL.IC

vCE = 0 ⟶ iC = IC + VCE/(RE//RL)

vomax = VCE-VCEsat

vomin = -RE//RL.IC

PONTO DE OPERAÇÃO PARA MÁXIMA EXCURSÃO DE SINAL

IC = (VCC-VCEsat)/(RE+RE//RL)

GANHO DE TENSÃO

Av = (hfe+1).RL'/(hie+(hfe+1).RL')   RL' = RE//RL

IMPEDÂNCIAS DE ENTRADA E SAÍDA

zi = RB//(hie+(hfe+1).RE//RL)   RB = R1//R2

zo = RE//(hie+RB//RSS/(hfe+1))

RESISTÊNCIAS EQUIVALENTES

ReqI = zi + RSS

ReqO = zo + RL

AMPLIFICADOR CONFIGURAÇÃO BASE COMUM

RETA DE CARGA CC

VCC = (RC+RE).IC + VCE

IC = 0 ⟶ VCE = VCC   VCE = 0 ⟶ IC = VCC/(RC+RE)

RETA DE CARGA CA E EXCURSÕES DE SINAL

VCC = RL'.iC + vCE + (RC.RC/(RC+RL)+RE).IC

iC = 0 ⟶ vCE = VCC - (RC.RC/(RC+RL)+RE).IC

vCE = 0 ⟶ iC = (VCC-(RC.RC/(RC+RL)+RE).IC)/RL'

vomax = RL'.IC   RL' = RC//RL

vomin = VCEsat - VCE

PONTO DE OPERAÇÃO PARA MÁXIMA EXCURSÃO DE SINAL

IC = (VCC-VCEsat)/(RC+RE+RC//RL)

GANHO DE TENSÃO

Av = hfe.RL'/hie   RL' = RE//RL

IMPEDÂNCIAS DE ENTRADA E SAÍDA

zi = RE//(hie/(hfe+1))

zo = RC

RESISTÊNCIAS EQUIVALENTES

ReqI = zi + RSS   ReqO = zo + RL

ReqB = RB//(hie+RE//RSS.(hfe+1))   RB = R1//R2

AMPLIFICADOR CONFIGURAÇÃO EMISSOR COMUM REALIMENTADO

RETA DE CARGA CC

VCC = (RC+RE).IC + VCE

IC = 0 ⟶ VCE = VCC   VCE = 0 ⟶ IC = VCC/(RC+RE)

RETA DE CARGA CA E EXCURSÕES DE SINAL

VCC = (RC+RE-RC.RC/(RC+RL)).iC +vCE+(RC.RC/(RC+RL)).IC

iC = 0 ⟶ vCE = VCC - (RC.RC/(RC+RL)).IC   vCE = 0 ⟶

iC = (VCC+(RC+RL))-RC.RC.IC)/(RC.RL+RC.RE+RE.RL)

vomax = RC//RL.IC

vomin = -(RC//RL/(RC//RL+RE)).(VCE-VCEsat)

PONTO DE OPERAÇÃO PARA MÁXIMA EXCURSÃO DE SINAL

IC = (VCC-VCEsat)/(RC+2.RE+RC//RL)

GANHO DE TENSÃO

Av = hfe.RL'/(hie+(hfe+1).RE)   RL' = RE//RL

IMPEDÂNCIAS DE ENTRADA E SAÍDA

zi = RB//(hie+(hfe+1).RE)

zo = RC

RESISTÊNCIAS EQUIVALENTES

ReqI = zi + RSS

ReqO = zo + RL

AMPLIFICADOR CONFIGURAÇÃO FONTE COMUM

RETA DE CARGA CC

VDD = (RS+RD).ID + VDS

ID = 0 ⟶ VDS = VDD   VDS = 0 ⟶ ID = VDD/(RS+RD)

RETA DE CARGA CA E EXCURSÕES DE SINAL

VDD = RD.iD + (RD/RL+1).vDS - (RD/RL).VDS + RS.ID

iD = 0 ⟶ vCE = VDS + RD//RL.ID

vDS = 0 ⟶ iD = ID + VDS/(RD//RL)

vomax = RD//RL.ID

vomin = VDSmin - VDS   para o JFET VDSmin = -VP

PONTO DE OPERAÇÃO PARA MÁXIMA EXCURSÃO DE SINAL

ID = (VDD-VDSmin)/(RS+RD+RD//RL)

GANHO DE TENSÃO

Av = -gm.rd//RL'   RL' = RD//RL

IMPEDÂNCIAS DE ENTRADA E SAÍDA

zi = RG   RG = R1//R2

zo = rd//RD

RESISTÊNCIAS EQUIVALENTES

ReqI = zi + RSS   ReqO = zo + RL

ReqS = RS/(1+gm.RS)

AMPLIFICADOR CONFIGURAÇÃO DRENO COMUM

RETA DE CARGA CC

VDD = RS.ID + VDS

ID = 0 ⟶ VDS = VDD   VDS = 0 ⟶ ID = VDD/RS

RETA DE CARGA CA E EXCURSÕES DE SINAL

VDD = vDS + RS//RL.iD + (RS-RS//RL).ID

iD = 0 ⟶ vDS = VDS + RS//RL.ID

vDS = 0 ⟶ iD = ID + VDS/(RS//RL)

vomax = VDS - VDSmin   para o JFET VDSmin = -VP

vomin = -RS//RL.ID

PONTO DE OPERAÇÃO PARA MÁXIMA EXCURSÃO DE SINAL

ID = (VDD-VDSmin)/(RS+RS//RL)

GANHO DE TENSÃO

Av = gm.rd//RL'/(1+gm.rd//RL')   RL' = RS//RL

IMPEDÂNCIAS DE ENTRADA E SAÍDA

zi = RG   RG = R1//R2

zo = rd//RS/(1+gm.rd//RS)

RESISTÊNCIAS EQUIVALENTES

ReqI = zi + RSS

ReqO = zo + RL

AMPLIFICADOR CONFIGURAÇÃO PORTA COMUM

RETA DE CARGA CC

VDD = (RS+RD).ID + VDS

ID = 0 ⟶ VDS = VDD   VDS = 0 ⟶ ID = VDD/(RS+RD)

RETA DE CARGA CA E EXCURSÕES DE SINAL

VDD = RD.iD + (1+A).vDS + RS.ID - A.VDS

iD = 0 ⟶ vDS = VDS + (RD/(1+A)).ID

vDS = 0 ⟶ iD = ID + VDS/(RD/(1+A))

vomax = RD//RL.ID   vomin = (Av/(Av-1)).(VDSmin-VDS)

A = (1/(Av-1)).(Av.RD/RL+1)

PONTO DE OPERAÇÃO PARA MÁXIMA EXCURSÃO DE SINAL

ID = (VDD-VDSmin)/(RD+RS+((Av-1)/Av).RD//RL)

GANHO DE TENSÃO   RL' = RD//RL   Av =

(1+gm.rd).RS.RL' / ((RD+RL').(RS+RSS)+(1+gm.rd).RS.RSS)

IMPEDÂNCIAS DE ENTRADA E SAÍDA

zi = (rd+RL').RS/(RS+RL'+(1+gm.RS).rd)   RS' = RS//RSS

zo = (rd+RS'+gm.rd.RS').RD/(rd+RS'+gm.rd.RS'+RD)

RESISTÊNCIAS EQUIVALENTES

ReqI = zi + RSS   CG não influi em f1 de

ReqO = zo + RL   modo significativo

ATUAÇÃO DO PROGRAMA

As opções de análise do programa apresentado são bastante variadas, mas podem ser resumidas em análise do ponto de operação e análise de amplificadores básicos com transistores de efeito de campo e bipolares.

O grande número de menus, dados e resultados envolvidos, exige um trabalho bastante apurado de formatação, de modo a apresentá-los de forma prática e estética. Este trabalho de formatação ocupa grande parte do programa apresentado.

A estrutura deste programa é razoavelmente complexa e o tempo dispendido para sua confecção e teste foi razoavelmente grande (longas madrugadas sem fim - agradecimentos pelo desabafo acrescidos de um pedido de desculpas pela citação). Para o entendimento do mesmo aconselha-se a realização dos exercícios apresentados neste capítulo, a fim de se adquirir maior familiariedade com os procedimentos envolvidos, principalmente se o leitor não conhecer . Feito isto pode-se efetuar uma análise mais tranquila do mesmo. A finalidade desta advertência não é desestimular o leitor, mas sim orientá-lo para não tentar analisar a listagem apresentada se não possuir algum conhecimento ou prática sobre a metologia de cálculo de amplificadores eletrônicos básicos. Uma vez conhecida esta metodologia torna-se mais tranquila a análise do programa, apresentada a seguir.

ANÁLISE DO PROGRAMA

Na linha 200 seleciona-se o modo texto com 40 colunas (SCREEN 0:WIDTH 40), define-se a função FNP(A,B) como sendo o paralelo de A e B, define-se o valor de PI e dimensionam-se algumas matrizes para armazenamento de valores a serem utilizados na análise de resposta em baixa frequência.

Nas linhas 210 a 240 são definidas algumas variáveis alfanuméricas que, declaradas por extenso cada vez que necessário, ocupariam uma área de memória muito grande.

O segmento de programa compreendido entre as linhas 1000 e 1120 apresentam o menu principal e direcionam o processamento conforme opção definida pelo usuário.

Entre as linhas 1500 e 1570 encontra-se o menu de análise de cada amplificador básico, o qual é acessado como uma subrotina ao se executar qualquer das opções numeradas de 3 a 9 no menu principal. Isto permite a obtenção de um programa de menor tamanho, além de ser mais racional. Observe-se ao longo da análise exposta que este recurso é empregado frequentemente quando diferentes opções de análise envolvem processamento semelhantes.

Entre as linhas 2000 e 2130 está definida a sub-rotina de apresentação dos resultados da análise de retas de carga e excursão de sinal. Entre 2500 e 2590 a de apresentação dos resultados da análise de ganhos e impedâncias. Entre 3000 e 3200 a de apresentação das retas de carga graficamente. Todas estas sub-rotinas mencionadas neste parágrafo são acessíveis por todas as opções de análise de amplificadores básicos (opções 3 a 9 do menu principal).

Entre as linhas 4000 e 4500 tem-se uma série de subrotinas auxiliares de formatação de resultados. A execeção fica por conta da sob-rotina definida na linha 4350, que calcula os ganhos de corrente, transimpedância e transadmitância a partir do ganho de tensão, impedâncias de entrada, de saída, de fonte e de carga.

Entre as linhas 5000 e 5230 são definidas subrotinas para impressão de resultados e entre 6000 e 6230 subrotinas para entrada de dados. As numerações correspondentes a cada dado são semelhantes. Por exemplo, o valor de VCC e impresso pela linha 5100 e introduzido pela linha 6100. Acessando-se estas sub-rotinas pode-se contruir facilmente menus que relacionem, o que efetivamente realizado por diversos segmentos do programa.

O segmento de programa compreendido entre as linhas 7000 e 8070 e responsável pela análise de resposta em baixa frequência para todos os amplificadores básicos analisados (opções 3 a 9 do menu principal). Dentro deste segmento de programa, o trecho compreendido entre as linhas 7000 e 7310, é responsável pela apresentação do menu, entrada de dados e direcionamento do processamento conforme opção selecionada. O trecho antre as linhas 7400 e 7470, calcula o valor dos capacitores se a frequência de corte desejada for especificada e o trecho entre as linhas 7700 e 7890 calcula a frequência de corte se for

especificado o valor dos capacitores. Em qualquer caso, os resultados são apresentados pela sub-rotina compreendida entre as linhas 8000 e 8070.

As análises do ponto de operação e dos desvios sofridos pelo mesmo, no caso do transistor bipolar, são realizadas no segmento de programa compreendido entre as linhas 10000 e 10480. O menu, a escolha da opção e o direcionamento do processamento encontram-se no trecho entre as linhas 10000 e 10150. As entradas de dados são realizada pelo trecho entre as linhas 10160 e 10270. Os cálculos são realizados entre as linhas 10280 e 10360 e a apresentação de resultados e feita pelo trecho entre as linhas 10370 e 10480.

As análises do ponto de operação e dos desvios sofridos pelo mesmo, no caso do transistor de efeito de campo, são realizadas no segmento de programa compreendido entre as linhas 11000 e 11420. O menu, a escolha da opção e o direcionamento do processamento encontram-se no trecho entre as linhas 10000 e 11130. As entradas de dados são realizada pelo trecho entre as linhas 11140 e 11230. Os cálculos são realizados entre as linhas 11240 e 11325 e a apresentação de resultados é feita pelo trecho entre as linhas 11330 e 11420.

O segmento de programa compreendido entre as linhas 12000 e 12600 é responsável pelas análises efetuadas para a configuração emissor comum. O menu, a escolha da opção e o direcionamento do processamento encontram-se no trecho entre as linhas 12000 e 12020. A análise das retas de carga e excursões de sinal é realizada pelo trecho entre as linhas 12200 e 12230. A análise de ganhos e impedâncias pelo trecho entre as linhas 12400 a 12430 e a análise de resposta em baixa frequência pela linhas 12600. Os trechos de programa especificados acessam frequentemente as sub-rotinas especificadas nos parágrafos anteriores. Isto pode-se ser verificado facilmente a partir da própria listagem.

Os segmentos de programa compreendidos entre as linhas 13000 e 13600, 14000 e 14600, ... , 18000 e 18600 são responsáveis pelas análise das demais configurações de amplificadores básicos relacionados no menu principal. A identificação de qual segmento de programa corresponde a qual configuração é bastante tranquila devido aos comentários (REM) inseridos na listagem.

LISTAGEM DO PROGRAMA

```
100 REM ********************************
110 REM *                              *
120 REM * PROGRAMA  APLICATIVO   PARA *
130 REM * CALCULO  DE  AMPLIFICADORES *
140 REM * ELETRONICOS BASICOS ******* *
150 REM * VERSAO 3.0 MSX NOVEMBRO  87 *
160 REM * RAUL M. P. FRIEDMANN ****** *
170 REM * CURITIBA * PARANA BRASIL ** *
180 REM *                              *
190 REM ********************************
200 CLEAR 1000:SCREEN 0:WIDTH 40:DEF FNP
(A,B)=(A*B)/(A+B):PI=4*ATN(1):DIM AA(8),
K(3),RK(3),FK(3),K$(3),KF(3),KK$(3)
210 SC$="Sequencia de calculo *****  * o
pcao"
220 RM$="Retorno ao  menu principal"
230 DN$="Dados necessarios ............
"
240 BB$="
      "
1000 REM MENU PRINCIPAL
1010 SCREEN 0
1020 PRINT"Analise   de   amplificadores
   basicos":PRINT
1030 PRINT"1 - Polarizacao de transistor
 bipolar .."
1040 PRINT"2 - Polarizacao de transistor
 JFET ....."
1050 PRINT"3 - Emissor comum ..........
..........."
1060 PRINT"4 - Coletor comum ..........
..........."
1070 PRINT"5 - Base comum .............
..........."
1080 PRINT"6 - Emissor comum realimentad
o ........."
1090 PRINT"7 - Fonte comum ............
..........."
1100 PRINT"8 - Dreno comum ............
..........."
1110 PRINT"9 - Porta comum ............
...........":PRINT
1120 OA=0:INPUT"* - Opcao ..............
........... ";OA:IF OA<1 OR OA>9 OR OA-F
IX(OA)<>0 THEN GOTO 1000 ELSE ON OA GOTO
 10000,11000,12000,13000,14000,15000,160
```

```
00,17000,18000
1500 REM SUBROTINA MENU DE ANALISE DO AM
PLIFICADOR
1510 SCREEN 0:PRINT OA$:PRINT
1520 PRINT"01 - Retas de carga e excurso
es de sinal"
1530 PRINT"02 - Tracado das retas de car
ga ........"
1540 PRINT"03 - Ganhos e impedancias ...
............"
1550 PRINT"04 - Resposta em baixa freque
ncia ......"
1560 PRINT"05 - ";RM$;" ........"
1570 PRINT:OP=5:INPUT"** - Opcao .......
.................. ";OP:IF OP<1 OR OP>5 O
R OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO 1500 ELSE RETU
RN
2000 REM SUBROTINA TELA DE RETAS DE CARG
A E EXCURSOES DE SINAL
2010 SCREEN 0
2020 PRINT AM$;OA$:PRINT"Reta de carga
 cc    pontos    notaveis"
2030 LOCATE 0,4:PRINT VC$;:X=0:GOSUB 400
0:LOCATE 22,4:PRINT IC$;:X=IM:GOSUB 4000

2040 LOCATE 0,5:PRINT VC$;:X=VV:GOSUB 40
00:LOCATE 22,5:PRINT IC$;:X=II:GOSUB 400
0
2050 LOCATE 0,6:PRINT VC$;:X=VM:GOSUB 40
00:LOCATE 22,6:PRINT IC$;:X=0:GOSUB 4000

2060 LOCATE 0,9:PRINT"Reta de carga   ca
   pontos    notaveis"
2070 LOCATE 0,11:PRINT VC$;:X=0:GOSUB 40
00:LOCATE 22,11:PRINT IC$;:X=IN:GOSUB 40
00
2080 LOCATE 0,12:PRINT VC$;:X=VV:GOSUB 4
000:LOCATE 22,12:PRINT IC$;:X=II:GOSUB 4
000
2090 LOCATE 0,13:PRINT VC$;:X=VN:GOSUB 4
000:LOCATE 22,13:PRINT IC$;:X=0:GOSUB 40
00
2100 LOCATE 0,16:PRINT"vomax = ";:X=MX:G
OSUB 4000:PRINT"     vomin = ";:X=MN:GOSU
B 4000
2110 LOCATE 0,19:PRINT"Condicao para max
```

```
ima  excursao  de sinal"
2120 LOCATE 0,21:PRINT VC$;:X=VO:GOSUB 4
000:LOCATE 22,21:PRINT IC$;:X=IO:GOSUB 4
000
2130 LOCATE 0,23:PRINT RM$;"  ****  ";:I
NPUT"<┘ ";RT$:GOTO 1000
2500 REM SUBROTINA TELA DE GANHOS E IMPE
DANCIAS
2510 SCREEN 0:PRINT OA$:PRINT:PRINT"Impe
dancias ..............................."
2520 LOCATE 0,6:PRINT"Zi     = ";:X=ZI:GO
SUB 4000:LOCATE 22,6:PRINT"RSS    = ";:X=
ZS:GOSUB 4000
2530 LOCATE 0,8:PRINT"Zo     = ";:X=ZO:GO
SUB 4000:LOCATE 22,8:PRINT"RL     = ";:X=
ZL:GOSUB 4000
2540 LOCATE 0,11:PRINT"Ganhos ..........
........................"
2550 LOCATE 0,14:PRINT"Av     = ";:X=AA(0
):GOSUB 4000:LOCATE 22,14:PRINT"Avs    =
";:X=AA(1):GOSUB 4000
2560 LOCATE 0,16:PRINT"Ai     = ";:X=AA(2
):GOSUB 4000:LOCATE 22,16:PRINT"Ais    =
";:X=AA(3):GOSUB 4000
2570 LOCATE 0,18:PRINT"Az     = ";:X=AA(4
):GOSUB 4000:LOCATE 22,18:PRINT"Azs    =
";:X=AA(5):GOSUB 4000
2580 LOCATE 0,20:PRINT"Ay     = ";:X=AA(6
):GOSUB 4000:LOCATE 22,20:PRINT"Ays    =
";:X=AA(7):GOSUB 4000
2590 LOCATE 0,23:PRINT RM$;"  ****  ";:I
NPUT"<┘ ";RT$:GOTO 1000
3000 REM SUBROTINA GRAFICO DAS RETAS DE
CARGA
3010 IF HX=0 THEN HX=VM
3020 IF HY=0 THEN HY=IN
3030 SCREEN 0:PRINT OA$:PRINT
3040 PRINT"Valores de referencia para o
tracado das":PRINT"retas de carga cc e c
a ....................":PRINT
3050 PRINT"1 - Tensao   maxima = ";:X=H
X:GOSUB 4000:PRINT" [  V ]"
3060 PRINT"2 - Corrente  maxima = ";:X=H
Y:GOSUB 4000:PRINT" [  A ]"
3070 PRINT"3 - Tracado das retas de carg
a ........."
```

```
3080 PRINT"4 - ";RM$;" ..........":PRINT
3090 OP=4:INPUT"* - Opcao ...............
............ ";OP:IF OP<1 OR OP>9 OR OP-F
IX(OP)<>0 THEN GOTO 3000 ELSE ON OP GOTO
 3100,3110,3120,1000
3100 LOCATE 0,23:INPUT"1 - Tensao    max
ima ";HX:GOTO 3000
3110 LOCATE 0,23:INPUT"2 - Corrente  max
ima ";HY:GOTO 3000
3120 SCREEN 2:LINE(0,0)-(0,180):LINE(0,1
80)-(240,180)
3130 LINE(240*VM/HX,180)-(0,180-180*IM/H
Y)
3140 LINE(240*VN/HX,180)-(0,180-180*IN/H
Y)
3150 FOR I=0 TO 240*VV/HX STEP 2:PSET(I,
180-180*II/HY):NEXT I
3160 FOR I=0 TO 180*II/HY STEP 2:PSET(24
0*VV/HX,180-I):NEXT I
3170 FOR I=0 TO 180*(IN-IN*MM/VN)/HY STE
P 2:PSET(240*MM/HX,180-I):NEXT I
3180 STRIG(0) ON:ON STRIG GOSUB 3200:RT=
1
3190 IF RT=1 THEN GOTO 3190 ELSE GOTO 10
00
3200 STRIG(0) OFF:RT=0:RETURN
4000 PRINT USING"+#.###^^^^";X;:RETURN
4100 SCREEN 0:PRINT OA$:PRINT:PRINT"Anal
ise de retas de carga cc  e  ca ....":PR
INT"Analise de excursoes de sinal ......
....":PRINT:PRINT DN$:LOCATE 0,18:PRINT"
08 - ";SC$:PRINT"09 - ";RM$:RETURN
4150 LOCATE 0,10:GOSUB 5090:GOSUB 5100:G
OSUB 5110:GOSUB 5120:GOSUB 5040:GOSUB 50
60:GOSUB 5070:FOR I=1 TO 7:LOCATE 0,I+9:
PRINT I:LOCATE 0,I+9:PRINT"0":NEXT I:RET
URN
4200 VC$="VCE    = ":IC$="IC     = ":VA$="
vCE    = ":IA$="iC     = ":VV=CE:II=IC:MM=
SA:RETURN
4250 SCREEN 0:PRINT OA$:PRINT"Analise de
 ganhos e impedancias .........":PRINT:PR
INT DN$:LOCATE 0,18:PRINT"09 - ";SC$:PRI
NT"10 - ";RM$:RETURN
4300 LOCATE 0,8:GOSUB 5010:GOSUB 5020:GO
SUB 5030:GOSUB 5040:GOSUB 5050:GOSUB 506
```

```
0:GOSUB 5070:GOSUB 5080:FOR I=1 TO 8:LOC
ATE 0,I+7:PRINT I:LOCATE 0,I+7:PRINT"0":
NEXT I:RETURN
4350 AA(1)=AA(0)*ZI/(ZI+ZS):AA(2)=ZI*AA(
0)/ZL:AA(3)=ZS*AA(1)/ZL:AA(4)=ZI*AA(0):A
A(5)=ZS*AA(1):AA(6)=AA(0)/ZL:AA(7)=AA(1)
/ZL:RETURN
4400 LOCATE 0,8:GOSUB 5130:GOSUB 5140:GO
SUB 5150:GOSUB 5160:GOSUB 5170:GOSUB 518
0:GOSUB 5190:FOR I=1 TO 7:LOCATE 0,I+7:P
RINT I:LOCATE 0,I+7:PRINT"0":NEXT I:RETU
RN
4450 LOCATE 0,10:GOSUB 5200:GOSUB 5210:G
OSUB 5220:GOSUB 5230:GOSUB 5160:GOSUB 51
80:GOSUB 5190:FOR I=1 TO 7:LOCATE 0,I+9:
PRINT I:LOCATE 0,I+9:PRINT"0":NEXT I:RET
URN
4500 VC$="VDS    = ":IC$="ID     = ":VA$="
vDS    = ":IA$="iD     = ":VV=DS:II=ID:MM=
V0:RETURN
5000 REM SUBROTINAS DE IMPRESSAO
5010 PRINT"     - hie      = ";:X=HI:GOSUB 4
000:PRINT" [  Ω ]":RETURN
5020 PRINT"     - hfe      = ";:X=HF:GOSUB 4
000:PRINT" [    ]":RETURN
5030 PRINT"     - RSS      = ";:X=XR:GOSUB 4
000:PRINT" [  Ω ]":RETURN
5040 PRINT"     - RL       = ";:X=LR:GOSUB 4
000:PRINT" [  Ω ]":RETURN
5050 PRINT"     - RB       = ";:X=RB:GOSUB 4
000:PRINT" [  Ω ]":RETURN
5060 PRINT"     - RE       = ";:X=RE:GOSUB 4
000:PRINT" [  Ω ]":RETURN
5070 PRINT"     - RC       = ";:X=RC:GOSUB 4
000:PRINT" [  Ω ]":RETURN
5080 PRINT"     - hoe      = ";:X=HO:GOSUB 4
000:PRINT" [  S ]":RETURN
5090 PRINT"     - VCEsat = ";:X=SA:GOSUB 4
000:PRINT" [  V ]":RETURN
5100 PRINT"     - VCC      = ";:X=CC:GOSUB 4
000:PRINT" [  V ]":RETURN
5110 PRINT"     - VCE      = ";:X=CE:GOSUB 4
000:PRINT" [  V ]":RETURN
5120 PRINT"     - IC       = ";:X=IC:GOSUB 4
000:PRINT" [  A ]":RETURN
5130 PRINT"     - gm       = ";:X=GM:GOSUB 4
```

```
000:PRINT" [  S ]":RETURN
5140 PRINT"   - rd       = ";:X=RO:GOSUB 4
000:PRINT" [  Ω ]":RETURN
5150 PRINT"   - RSS      = ";:X=RX:GOSUB 4
000:PRINT" [  Ω ]":RETURN
5160 PRINT"   - RL       = ";:X=RL:GOSUB 4
000:PRINT" [  Ω ]":RETURN
5170 PRINT"   - RG       = ";:X=RG:GOSUB 4
000:PRINT" [  Ω ]":RETURN
5180 PRINT"   - RS       = ";:X=RS:GOSUB 4
000:PRINT" [  Ω ]":RETURN
5190 PRINT"   - RD       = ";:X=RD:GOSUB 4
000:PRINT" [  Ω ]":RETURN
5200 PRINT"   - VDSmin   = ";:X=V0:GOSUB 4
000:PRINT" [  V ]":RETURN
5210 PRINT"   - VDD      = ";:X=DD:GOSUB 4
000:PRINT" [  V ]":RETURN
5220 PRINT"   - VDS      = ";:X=DS:GOSUB 4
000:PRINT" [  V ]":RETURN
5230 PRINT"   - ID       = ";:X=ID:GOSUB 4
000:PRINT" [  A ]":RETURN
5340 PRINT"   - ";SC$
5350 PRINT"   - ";RM$
6000 REM SUBROTINAS DE ENTRADA
6010 INPUT"** - hie      ";HI:RETURN
6020 INPUT"** - hfe      ";HF:RETURN
6030 INPUT"** - RSS      ";XR:RETURN
6040 INPUT"** - RL       ";LR:RETURN
6050 INPUT"** - RB       ";RB:RETURN
6060 INPUT"** - RE       ";RE:RETURN
6070 INPUT"** - RC       ";RC:RETURN
6080 INPUT"** - hoe      ";HO:RETURN
6090 INPUT"** - VCEsat   ";SA:RETURN
6100 INPUT"** - VCC      ";CC:RETURN
6110 INPUT"** - VCE      ";CE:RETURN
6120 INPUT"** - IC       ";IC:RETURN
6130 INPUT"** - gm       ";GM:RETURN
6140 INPUT"** - rd       ";RO:RETURN
6150 INPUT"** - RSS      ";RX:RETURN
6160 INPUT"** - RL       ";RL:RETURN
6170 INPUT"** - RG       ";RG:RETURN
6180 INPUT"** - RS       ";RS:RETURN
6190 INPUT"** - RD       ";RD:RETURN
6200 INPUT"** - VDSmin   ";V0:RETURN
6210 INPUT"** - VDD      ";DD:RETURN
6220 INPUT"** - VDS      ";DS:RETURN
```

```
6230 INPUT"** - ID        ";ID:RETURN
7000 REM SUBROTINA RESPOSTA EM BAIXA FRE
QUENCIA
7010 K$(1)="CI":K$(2)="CO":IF OA=4 OR OA
=6 OR OA=8 OR OA=9 THEN NC=2 ELSE NC=3
7015 RT=1:SCREEN 0:PRINT OA$:PRINT"Anali
se de resposta em baixa  frequencia":PRI
NT:PRINT"01 - f1       ---->    capacitores
":PRINT:PRINT"02 - Capacitores      ---->
   f1":PRINT:PRINT"03 - ";RM$
7020 LOCATE 0,23:OP=3:INPUT"** - Opcao
";OP:IF OP<1 OR OP>3 OR OP-FIX(OP)<>0 TH
EN GOTO 7020 ELSE ON OP GOTO 7070,7030,7
200
7030 SCREEN 0:PRINT AM$;OA$:PRINT"Analis
e de resposta em baixa  frequencia":FOR
I=1 TO NC:LOCATE 0,4+2*I:PRINT I;"- ";K$
(I);"        = ";:X=K(I):GOSUB 4000:PRINT"
[ F ]":LOCATE 0,4+2*I:PRINT"0":NEXT I
7040 LOCATE 0,18:PRINT"04 - ";SC$:PRINT"
05 - ";RM$
7050 IF NC=2 THEN LOCATE 0,9:PRINT BB$:L
OCATE 0,18:PRINT"03":PRINT:PRINT"04"
7060 LOCATE 33,20:OP=NC+2:INPUT"*  ";OP:
IF OP<1 OR OP>NC+2 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN
 GOTO 7030 ELSE IF NC=2 THEN ON OP GOTO
7310,7310,7700,7200 ELSE IF NC=3 THEN ON
 OP GOTO 7310,7310,7310,7700,7200
7070 SCREEN 0:PRINT OA$:PRINT"Analise de
 resposta em baixa  frequencia":LOCATE 0
,5:PRINT"01 - f1       = ";:X=FC:GOSUB 400
0:PRINT" [ Hz ]":LOCATE 0,18:PRINT"02 -
";SC$:PRINT"03 - ";RM$
7080 LOCATE 33,20:OP=3:INPUT"*  ";OP:IF
OP<1 OR OP>3 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO
7070 ELSE ON OP GOTO 7300,7400,7200
7200 RETURN
7300 LOCATE 0,23:INPUT"** - f1       ";FC:
IF FC<=0 THEN SCREEN 0:PRINT"** - f1
 ≥ 0":GOTO 7300 ELSE GOTO 7070
7310 LOCATE 0,23:PRINT"** - ";K$(OP);"
   ";:INPUT K(OP):GOTO 7030
7400 REM F -> C
7410 F1=FC:RK(1)=ZS+ZI:RK(2)=ZL+ZO
7420 FOR I=1 TO NC
7430 IF FC<>0 AND RK(I)<>0 THEN K(I)=1/(
```

```
2*PI*RK(I)*FC):FK(I)=FC
7440 LOCATE 26,14:PRINT"f1  ";:X=F1:GOSU
B 4000
7450 PD$=" "
7460 MS$="Para obter a frequencia de cor
te indica-
          da adotar um dos capacitores i
ndicados e
          multiplicar os demais por  dez
  ou  mais"
7470 NEXT I:GOTO 8000
7700 REM C -> F
7710 RK(1)=ZS+ZI:RK(2)=ZL+ZO
7720 FOR I=1 TO NC
7730 IF RK(I)<>0 AND K(I)<>0 THEN FK(I)=
1/(2*PI*RK(I)*K(I))
7740 NEXT I
7750 FOR I=1 TO NC:KF(I)=FK(I):KK$(I)=K$
(I):NEXT I
7760 FOR I=1 TO NC:FOR J=I TO NC
7770 IF KF(J)>KF(I) THEN SWAP KF(J),KF(I
):SWAP KK$(J),KK$(I)
7780 NEXT J:NEXT I
7790 MS$="- para analise deta-
                              lhada real
izar os estudos dos  diagramas
                              de Bode de
 modulo e de fase ************"
7800 IF KF(1)/KF(2)<10 THEN GOTO 7810 EL
SE GOTO 7840
7810 F1=KF(1)+KF(2):IF NC=3 THEN F1=F1+K
F(3)
7820 MS$="f1 valor aproximado "+MS$
7830 GOTO 8000
7840 F1=KF(1)
7850 MS$=KK$(1)+" e polo dominante "+MS$

7860 GOTO 8000
7890 IF KF(1)/KF(2)<=10 THEN GOTO 7800 E
LSE GOTO 7900
8000 REM TELA DE ANALISE NAS BAIXAS
8010 SCREEN 0:PRINT OA$:PRINT"Analise de
 resposta em baixa  frequencia":LOCATE 2
5,5:PRINT"Req          p"
8040 LOCATE 26,13:PRINT"f1  ";:X=F1:GOSU
B 4000
```

```
8050 FOR I=1 TO NC:LOCATE 0,5+2*I:PRINT
K$(I):LOCATE 6,5+2*I:X=K(I):GOSUB 4000:L
OCATE 18,5+2*I:X=RK(I):GOSUB 4000:LOCATE
 30,5+2*I:X=FK(I):GOSUB 4000:NEXT I
8060 LOCATE 0,16:PRINT MS$:LOCATE 0,13:P
RINT PD$
8070 LOCATE 0,23:PRINT RM$;" ****** ";:I
NPUT"<┘ ";RT$:GOTO 7200
10000 REM POLARIZACAO BIPOLAR
10010 SCREEN 0:PRINT"Analise do ponto de
 operacao  e  desvios
                        Dados necessarios
   transistor bipolar":PRINT
10020 PRINT"01 - VCC      = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";CC;:PRINT" [  V ]"
10030 PRINT"02 - VB       = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";VB;:PRINT" [  V ]"
10040 PRINT"03 - RB       = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";RB;:PRINT" [  Ω ]"
10050 PRINT"04 - RC       = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";RC;:PRINT" [  Ω ]"
10060 PRINT"05 - RE       = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";RE;:PRINT" [  Ω ]"
10070 PRINT"06 - ICBO1    = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";O1;:PRINT" [  A ]"
10080 PRINT"07 - ICBO2    = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";O2;:PRINT" [  A ]"
10090 PRINT"08 - VBE1     = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";E1;:PRINT" [  V ]"
10100 PRINT"09 - VBE2     = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";E2;:PRINT" [  V ]"
10110 PRINT"10 - β1       = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";B1;:PRINT" [    ]"
10120 PRINT"11 - β2       = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";B2;:PRINT" [    ]"
10130 PRINT:PRINT:PRINT"12 - ";SC$:PRINT
"13 - ";RM$
10140 LOCATE 33,20:OP=13:INPUT"*  ";OP:I
F OP<1 OR OP>13 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GO
TO 10000
10150 LOCATE 0,23:ON OP GOTO 10170,10180
,10190,10200,10210,10220,10230,10240,102
50,10260,10270,10280,1000
10160 REM ENTRADAS DE DADOS
10170 INPUT"** - VCC     ";CC:GOTO 10000
10180 INPUT"** - VB      ";VB:GOTO 10000
```

```
10190 INPUT"** - RB       ";RB:GOTO 10000
10200 INPUT"** - RC       ";RC:GOTO 10000
10210 INPUT"** - RE       ";RE:GOTO 10000
10220 INPUT"** - ICBO1    ";O1:IF O2<>O1 T
HEN O2=O1:GOTO 10000 ELSE GOTO 10000
10230 INPUT"** - ICBO2    ";O2:GOTO 10000
10240 INPUT"** - VBE1     ";E1:IF E2<>E1 T
HEN E2=E1:GOTO 10000 ELSE GOTO 10000
10250 INPUT"** - VBE2     ";E2:GOTO 10000
10260 INPUT"** - β1       ";B1:IF B1<>B2 T
HEN B2=B1:GOTO 10000 ELSE GOTO 10000
10270 INPUT"** - β2       ";B2:GOTO 10000
10280 REM SEQUENCIA DE CALCULO
10290 QI=B1*(VB-E1+(B1+1)*O1*RE)/(RB+(B1
+1)*RE)+(B1+1)*O1:QV=CC-QI*(RC+RE)
10300 S0=B1*(RB+RE)/(RB+B1*RE)
10310 S1=-B1/(RB+B1*RE)
10320 S2=QI*RB/(B1*(RB+B2*RE))
10330 D0=S0*(O2-O1)
10340 D1=S1*(E2-E1)
10350 D2=S2*(B2-B1)
10360 D3=D0+D1+D2:RI=QI+D3:RV=CC-RI*(RC+
RE)
10370 REM FORMATACAO DOS RESULTADOS
10380 SCREEN 0:PRINT"Ponto de operacao *
**** situacao inicial":LOCATE 0,5:PRINT"
Ponto de operacao ***** situacao  final
":LOCATE 0,10:PRINT"Analise  do  desvio
 entre  as situacoes"
10390 LOCATE 0,2:PRINT"VCE1   = ";:X=QV:
GOSUB 4000:PRINT"  IC1    = ";:X=QI:GOSU
B 4000
10400 LOCATE 0,7:PRINT"VCE2   = ";:X=RV:
GOSUB 4000:PRINT"  IC2    = ";:X=RI:GOSU
B 4000
10410 LOCATE 0,12:PRINT"S      = ";:X=S0
:GOSUB 4000:PRINT"  ΔICBO  = ";:X=O2-O1:
GOSUB 4000
10420 LOCATE 0,13:PRINT"S'     = ";:X=S1
:GOSUB 4000:PRINT"  ΔVBE   = ";:X=E2-E1:
GOSUB 4000
10430 LOCATE 0,14:PRINT"S''    = ";:X=S2
:GOSUB 4000:PRINT"  Δβ     = ";:X=B2-B1:
GOSUB 4000
10440 LOCATE 0,16:PRINT"ΔIC(ΔICBO)":LOCA
TE 28,16:PRINT"= ";:X=D0:GOSUB 4000
```

```
10450 LOCATE 0,17:PRINT"ΔIC(ΔVBE )":LOCA
TE 28,17:PRINT"= ";:X=D1:GOSUB 4000
10460 LOCATE 0,18:PRINT"ΔIC(Δβ    )":LOCA
TE 28,18:PRINT"= ";:X=D2:GOSUB 4000
10470 LOCATE 0,20:PRINT"ΔIC          ":LOCA
TE 28,20:PRINT"= ";:X=D3:GOSUB 4000
10480 LOCATE 0,23:PRINT RM$;:LOCATE 34,2
3:INPUT"<┘ ";RT$:GOTO 1000
11000 REM POLARIZACAO JFET
11010 SCREEN 0:PRINT"Analise do ponto de
 operacao  e  desvios
                  Dados necessarios
      transistor JFET":PRINT
11020 PRINT"01 - VDD     = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";DD;:PRINT" [  V ]"
11030 PRINT"02 - RD      = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";RD;:PRINT" [  Ω ]"
11040 PRINT"03 - RS      = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";RS;:PRINT" [  Ω ]"
11050 PRINT"04 - VG1     = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";G1;:PRINT" [  V ]"
11060 PRINT"05 - VG2     = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";G2;:PRINT" [  V ]"
11070 PRINT"06 - VP1     = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";P1;:PRINT" [  V ]"
11080 PRINT"07 - VP2     = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";P2;:PRINT" [  V ]"
11090 PRINT"08 - IDSS1   = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";I1;:PRINT" [  A ]"
11100 PRINT"09 - IDSS2   = ";:PRINT USING
"+#.###^^^^";I2;:PRINT" [  A ]"
11110 PRINT:PRINT:PRINT"10 - ";SC$:PRINT
"11 - ";RM$
11120 LOCATE 33,18:OP=11:INPUT"*  ";OP:I
F OP<1 OR OP>11 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GO
TO 11000
11130 LOCATE 0,21:ON OP GOTO 11150,11160
,11170,11180,11190,11200,11210,11220,112
30,11240,1000
11140 REM ENTRADAS DE DADOS
11150 INPUT"** - VDD      ";DD:GOTO 11000
11160 INPUT"** - RD       ";RD:GOTO 11000
11170 INPUT"** - RS       ";RS:GOTO 11000
11180 INPUT"** - VG1      ";G1:IF G2<>G1 T
HEN G2=G1:GOTO 11000 ELSE GOTO 11000
11190 INPUT"** - VG2      ";G2:GOTO 11000
```

```
11200 INPUT"** - VP1    ";P1:IF P2<>P1 T
HEN P2=P1:GOTO 11000 ELSE GOTO 11000
11210 INPUT"** - VP2    ";P2:GOTO 11000
11220 INPUT"** - IDSS1  ";I1:IF I2<>I1 T
HEN I2=I1:GOTO 11000 ELSE GOTO 11000
11230 INPUT"** - IDSS2  ";I2:GOTO 11000
11240 REM SEQUENCIA DE CALCULO
11250 A=1/P1^2:B=-2/P1+1/RS/I1:C=1-G1/RS
/I1
11260 D=B^2-4*A*C:IF D<0 THEN GOTO 1000
11270 X1=(-B+SQR(D))/(2*A):Y1=(G1-X1)/RS
:Z1=DD-(RS+RD)*Y1:X2=(-B-SQR(D))/(2*A):Y
2=(G1-X2)/RS:Z2=DD-(RS+RD)*Y2
11280 IF X1>=P1 AND X1<=0 AND Y1>=0 AND
Y1<=I1 AND Z1>0 AND Z2 <=DD THEN GQ=X1:I
Q=Y1:VQ=Z1 ELSE IF X2>=VP AND X2<=0 AND
Y2>=0 AND Y2<=I1 AND Z2>=0 AND Z2<=DD TH
EN GQ=X2:IQ=Y2:VQ=Z2 ELSE GOTO 11420
11285 MQ=-2*I1/P1*(1-GQ/P1)
11290 A=1/P2^2:B=-2/P2+1/RS/I2:C=1-G2/RS
/I2
11300 D=B^2-4*A*C:IF D<0 THEN GOTO 11420

11310 X1=(-B+SQR(D))/(2*A):Y1=(G2-X1)/RS
:Z1=DD-(RS+RD)*Y1:X2=(-B-SQR(D))/(2*A):Y
2=(G2-X2)/RS:Z2=DD-(RS+RD)*Y2
11320 IF X1>=P2 AND X1<=0 AND Y1>=0. AND
Y1<=I2 AND Z1>0 AND Z2 <=DD THEN GR=X1:I
R=Y1:VR=Z1 ELSE IF X2>=V2 AND X2<=0 AND
Y2>=0 AND Y2<=I2 AND Z2>=0 AND Z2<=DD TH
EN GR=X2:IR=Y2:VR=Z2 ELSE GOTO 11420
11325 MR=-2*I2/P2*(1-GQ/P2)
11330 SCREEN 0:PRINT"Ponto de operacao *
**** situacao inicial":LOCATE 0,5:PRINT"
Ponto de operacao ***** situacao   final
":LOCATE 0,10:PRINT"Analise  do  desvio
 entre  as situacoes"
11340 LOCATE 0,2:PRINT"VDS1    = ";:X=VQ:
GOSUB 4000:PRINT"  ID1     = ";:X=IQ:GOSU
B 4000
11350 LOCATE 0,7:PRINT"VDS2    = ";:X=VR:
GOSUB 4000:PRINT"  ID2     = ";:X=IR:GOSU
B 4000
11360 LOCATE 0,12:PRINT"VG1     = ";:X=G1
:GOSUB 4000:PRINT"  VG2     = ";:X=G2:GOS
UB 4000
```

```
11370 LOCATE 0,14:PRINT"VP1     = ";:X=P1
:GOSUB 4000:PRINT"  VP2     = ";:X=P2:GOS
UB 4000
11380 LOCATE 0,16:PRINT"VGS1    = ";:X=GQ
:GOSUB 4000:PRINT"  VGS2    = ";:X=GR:GOS
UB 4000
11390 LOCATE 0,18:PRINT"IDSS1   = ";:X=I1
:GOSUB 4000:PRINT"  IDSS2   = ";:X=I2:GOS
UB 4000
11400 LOCATE 0,20:PRINT"gm1     = ";:X=MQ
:GOSUB 4000:PRINT"  gm2     = ";:X=MR:GOS
UB 4000
11410 LOCATE 0,23:PRINT RM$;:LOCATE 34,2
3:INPUT"<┘ ";RM$:GOTO 1000
11420 SCREEN 0:PRINT"Situacao com soluca
o incoerente ........
                        ID > IDSS   VDS < 0
   VGS > 0    VGS < VP":PRINT RM$;" *****
* ";:INPUT"<┘ ";RM$:GOTO 1000
12000 REM AMPLIFICADOR EMISSOR COMUM
12010 OA$="Amplificador .............. em
issor comum"
12020 GOSUB 1500:ON OP GOTO 12200,3000,1
2400,12600,1000
12200 GOSUB 4100:GOSUB 4150
12210 LOCATE 33,20:OP=9:INPUT"*  ";OP:IF
 OP<1 OR OP>9 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO
 12200 ELSE LOCATE 0,23:ON OP GOSUB 6090
,6100,6110,6120,6040,6060,6070,12220,100
0:GOTO 12200
12220 SCREEN 0:PRINT"VCC = ";:X=CE+(RC+R
E)*IC:GOSUB 4000:PRINT " para coerencia
de dados":PRINT"VCC = ";:X=CC:GOSUB 4000
:PRINT:PRINT:INPUT"VCC ";CC
12230 VM=CC:IM=CC/(RC+RE):VN=CE+FNP(RC,L
R)*IC:IN=IC+CE/FNP(RC,LR):IO=(CC-SA)/(RC
+RE+FNP(RC,LR)):VO=CC-(RC+RE)*IO:MX=IC*F
NP(RC,LR):MN=SA-CE:GOSUB 4200:GOTO 2000
12400 GOSUB 4250:GOSUB 4300
12410 LOCATE 33,20:OP=10:INPUT"*  ";OP:I
F OP<1 OR OP>10 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GO
TO 12400 ELSE LOCATE 0,23:ON OP GOSUB 60
10,6020,6030,6040,6050,6060,6070,6080,12
420,1000:GOTO 12400
12420 IF HO=0 THEN RR=RC ELSE RR=FNP(RC,
1/HO)
```

```
12430 ZI=FNP(RB,HI):ZO=RR:AA(0)=-HF*FNP(
RR,LR)/HI:ZS=XR:ZL=LR:GOSUB 4350:GOTO 25
00
12600 FC=XF:K(1)=IK:K(2)=OK:K(3)=EK:K$(3
)="CE":RK(3)=FNP(RE,(HI+FNP(RB,XR))/(HF+
1)):GOSUB 7000:XF=FC:IK=K(1):OK=K(2):EK=
K(3):GOTO 1000
13000 REM AMPLIFICADOR COLETOR COMUM
13010 OA$="Amplificador ............. co
letor comum"
13020 GOSUB 1500:ON OP GOTO 13200,3000,1
3400,13600,1000
13200 GOSUB 4100:GOSUB 4150:LOCATE 0,16:
PRINT BB$:LOCATE 0,18:PRINT"07":LOCATE 0
,20:PRINT"08"
13210 LOCATE 33,20:OP=8:INPUT"*  ";OP:IF
 OP<1 OR OP>8 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO
 13200 ELSE LOCATE 0,23:ON OP GOSUB 6090
,6100,6110,6120,6040,6060,13220,1000:GOT
O 13200
13220 SCREEN 0:PRINT"VCC = ";:X=CE+RE*IC
:GOSUB 4000:PRINT " para coerencia de da
dos":PRINT"VCC = ";:X=CC:GOSUB 4000:PRIN
T:PRINT:INPUT"VCC ";CC
13230 VM=CC:IM=CC/RE:VN=CE+FNP(RE,LR)*IC
:IN=IC+CE/FNP(RE,LR):IO=(CC-SA)/(RE+FNP(
RE,LR)):VO=CC-RE*IO:MX=CE-SA:MN=-IC*FNP(
RE,LR):GOSUB 4200:GOTO 2000
13400 GOSUB 4250:GOSUB 4300:LOCATE 0,14:
PRINT BB$:PRINT BB$:LOCATE 0,18:PRINT"07
":LOCATE 0,20:PRINT"08"
13410 LOCATE 33,20:OP=8:INPUT"*  ";OP:IF
 OP<1 OR OP>8 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO
 13400 ELSE LOCATE 0,23:ON OP GOSUB 6010
,6020,6030,6040,6050,6060,13420,1000:GOT
O 13400
13420 RR=FNP(RE,LR)
13430 ZI=FNP(RB,HI+(HF+1)*FNP(LR,RE)):ZO
=FNP(RE,(HI+FNP(XR,RB))/(HF+1)):AA(0)=(H
F+1)*RR/(HI+(HF+1)*RR):ZS=XR:ZL=LR:GOSUB
 4350:GOTO 2500
13600 FC=XF:K(1)=IK:K(2)=OK:GOSUB 7000:X
F=FC:IK=K(1):OK=K(2):GOTO 1000
14000 REM AMPLIFICADOR BASE COMUM
14010 OA$="Amplificador ...............
 base comum"
```

```
14020 GOSUB 1500:ON OP GOTO 14200,3000,1
4400,14600,1000
14200 GOSUB 4100:GOSUB 4150
14210 LOCATE 33,20:OP=9:INPUT"*  ";OP:IF
 OP<1 OR OP>9 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO
 14200 ELSE LOCATE 0,23:ON OP GOSUB 6090
,6100,6110,6120,6040,6060,6070,14220,100
0:GOTO 14200
14220 SCREEN 0:PRINT"VCC = ";:X=CE+(RC+R
E)*IC:GOSUB 4000:PRINT " para coerencia
de dados":PRINT"VCC = ";:X=CC:GOSUB 4000
:PRINT:PRINT:INPUT"VCC ";CC
14230 VM=CC:IM=CC/(RC+RE):VN=CC-(RC^2/(R
C+LR)+RE)*IC:IN=VN/FNP(RC,LR):IO=(CC-SA)
/(RC+RE+FNP(RC,LR)):VO=CC-(RC+RE)*IO:MX=
IC*FNP(RC,LR):MN=SA-CE:GOSUB 4200:GOTO 2
000
14400 GOSUB 4250:GOSUB 4300:LOCATE 0,15:
PRINT BB$:LOCATE 0,18:PRINT"08":LOCATE 0
,20:PRINT"09"
14410 LOCATE 33,20:OP=9:INPUT"*  ";OP:IF
 OP<1 OR OP>9 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO
 14400 ELSE LOCATE 0,23:ON OP GOSUB 6010
,6020,6030,6040,6050,6060,6070,14420,100
0:GOTO 14400
14420 RR=FNP(RC,LR)
14430 ZI=FNP(RE,HI/(HF+1)):ZO=RC:AA(0)=H
F*RR/HI:ZS=XR:ZL=LR:GOSUB 4350:GOTO 2500

14600 FC=XF:K(1)=IK:K(2)=OK:K(3)=BK:K$(3
)="CB":RK(3)=FNP(RB,(HI+FNP(RE,XR)*(HF+1
))):GOSUB 7000:XF=FC:IK=K(1):OK=K(2):BK=
K(3):GOTO 1000
15000 REM AMP EMISSOR COMUM SEM CE
15010 OA$="Amplificador  emissor comum r
ealimentado"
15020 GOSUB 1500:ON OP GOTO 15200,3000,1
5400,15600,1000
15200 GOSUB 4100:GOSUB 4150
15210 LOCATE 33,20:OP=9:INPUT"*  ";OP:IF
 OP<1 OR OP>9 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO
 15200 ELSE LOCATE 0,23:ON OP GOSUB 6090
,6100,6110,6120,6040,6060,6070,15220,100
0:GOTO 15200
15220 SCREEN 0:PRINT"VCC = ";:X=CE+(RC+R
E)*IC:GOSUB 4000:PRINT " para coerencia
```

```
de dados":PRINT"VCC = ";:X=CC:GOSUB 4000
:PRINT:PRINT:INPUT"VCC ";CC
15230 VM=CC:IM=CC/(RC+RE):VN=CC-RC^2/(RC
+LR)*IC:IN=(CC*(RC+LR)-RC^2*IC)/(RC*LR+R
C*RE+RE*LR):IO=(CC-SA)/(RC+2*RE+FNP(RC,L
R)):VO=CC-(RC+RE)*IO:MX=IC*FNP(RC,LR):MN
=-FNP(RC,LR)*(CE-SA)/(FNP(RC,LR)+RE):GOS
UB 4200:GOTO 2000
15400 GOSUB 4250:GOSUB 4300:LOCATE 0,15:
PRINT BB$:LOCATE 0,18:PRINT"08":LOCATE 0
,20:PRINT"09"
15410 LOCATE 33,20:OP=9:INPUT"*  ";OP:IF
 OP<1 OR OP>9 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO
 15400 ELSE LOCATE 0,23:ON OP GOSUB 6010
,6020,6030,6040,6050,6060,6070,15420,100
0:GOTO 15400
15420 RR=FNP(RC,LR)
15430 ZI=FNP(RB,HI+(HF+1)*RE):ZO=RC:AA(0
)=-HF*RR/(HI+(HF+1)*RE):ZS=XR:ZL=LR:GOSU
B 4350:GOTO 2500
15600 FC=XF:K(1)=IK:K(2)=OK:GOSUB 7000:X
F=FC:IK=K(1):OK=K(2):GOTO 1000
16000 REM AMPLIFICADOR FONTE COMUM
16010 OA$="Amplificador ................
fonte comum"
16020 GOSUB 1500:ON OP GOTO 16200,3000,1
6400,16600,1000
16200 GOSUB 4100:GOSUB 4450
16210 LOCATE 33,20:OP=9:INPUT"*  ";OP:IF
 OP<1 OR OP>9 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO
 16200 ELSE LOCATE 0,23:ON OP GOSUB 6200
,6210,6220,6230,6160,6180,6190,16220,100
0:GOTO 16200
16220 SCREEN 0:PRINT"VDD = ";:X=DS+(RD+R
S)*ID:GOSUB 4000:PRINT " para coerencia
de dados":PRINT"VDD = ";:X=DD:GOSUB 4000
:PRINT:PRINT:INPUT"VDD ";DD
16230 VM=DD:IM=DD/(RD+RS):VN=DS+FNP(RD,R
L)*ID:IN=ID+DS/FNP(RD,RL):IO=(DD-V0)/(RD
+RS+FNP(RD,RL)):VO=DD-(RD+RS)*IO:MX=ID*F
NP(RD,RL):MN=V0-DS:GOSUB 4500:GOTO 2000
16400 GOSUB 4250:GOSUB 4400:LOCATE 0,18:
PRINT"08":LOCATE 0,20:PRINT"09"
16410 LOCATE 33,20:OP=9:INPUT"*  ";OP:IF
 OP<1 OR OP>9 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO
 16400 ELSE LOCATE 0,23:ON OP GOSUB 6130
```

```
,6140,6150,6160,6170,6180,6190,16420,100
0:GOTO 16400
16420 RR=FNP(RD,RL)
16430 ZI=RG:ZO=FNP(RO,RD):AA(0)=-GM*FNP(
RO,RR):ZS=RX:ZL=RL:GOSUB 4350:GOTO 2500
16600 FC=FX:K(1)=KI:K(2)=KO:K(3)=KS:K$(3
)="CS":RK(3)=RS/(1+GM*RS):GOSUB 7000:FX=
FC:KI=K(1):KO=K(2):KS=K(3):GOTO 1000
17000 REM AMPLIFICADOR DRENO COMUM
17010 OA$="Amplificador ................
dreno comum"
17020 GOSUB 1500:ON OP GOTO 17200,3000,1
7400,17600,1000
17200 GOSUB 4100:GOSUB 4450:LOCATE 0,16:
PRINT"
     ":LOCATE 0,18:PRINT"07":LOCATE 0,2
0:PRINT"08"
17210 LOCATE 33,20:OP=8:INPUT"*  ";OP:IF
 OP<1 OR OP>8 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO
 17200 ELSE LOCATE 0,23:ON OP GOSUB 6200
,6210,6220,6230,6160,6180,17220,1000:GOT
O 17200
17220 SCREEN 0:PRINT"VDD = ";:X=DS+RS*ID
:GOSUB 4000:PRINT " para coerencia de da
dos":PRINT"VDD = ";:X=DD:GOSUB 4000:PRIN
T:PRINT:INPUT"VDD ";DD
17230 VM=DD:IM=DD/RS:VN=DS+FNP(RS,RL)*ID
:IN=ID+DS/FNP(RS,RL):IO=(DD-V0)/(RS+FNP(
RS,RL)):VO=DD-RS*IO:MX=DS-V0:MN=-ID*FNP(
RS,RL):GOSUB 4500:GOTO 2000
17400 GOSUB 4250:GOSUB 4400:LOCATE 0,14:
PRINT BB$:LOCATE 0,18:PRINT"07":LOCATE 0
,20:PRINT"08"
17410 LOCATE 33,20:OP=8:INPUT"*  ";OP:IF
 OP<1 OR OP>8 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO
 17400 ELSE LOCATE 0,23:ON OP GOSUB 6130
,6140,6150,6160,6170,6180,17420,1000:GOT
O 17400
17420 RR=FNP(RS,RL)
17430 ZI=RG:ZO=FNP(RO,RS)/(1+GM*FNP(RO,R
S)):AA(0)=GM*FNP(RO,RR)/(1+GM*FNP(RO,RR)
):ZS=RX:ZL=RL:GOSUB 4350:GOTO 2500
17600 FC=FX:K(1)=KI:K(2)=KO:GOSUB 7000:F
X=FC:KI=K(1):KO=K(2):GOTO 1000
18000 REM AMPLIFICADOR PORTA COMUM
18010 OA$="Amplificacor ................
```

```
porta comum"
18020 GOSUB 1500:ON OP GOTO 18200,3000,1
8400,18600,1000
18200 GOSUB 4100:GOSUB 4450
18210 LOCATE 33,20:OP=9:INPUT"*  ";OP:IF
 OP<1 OR OP>9 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO
 16200 ELSE LOCATE 0,23:ON OP GOSUB 6200
,6210,6220,6230,6160,6180,6190,18220,100
0:GOTO 18200
18220 SCREEN 0:PRINT"VDD = ";:X=DS+(RD+R
S)*ID:GOSUB 4000:PRINT " para coerencia
de dados":PRINT"VDD = ";:X=DD:GOSUB 4000
:PRINT:PRINT:INPUT"VDD ";DD
18230 VM=DD:IM=DD/(RD+RS):A=(1/(AA(0)-1)
)*(AA(0)*RD/RL+1):VN=DS+(RD/(1+A))*ID:IN
=ID+DS/(RD/(1+A)):IO=(DD-V0)/(RD+RS+((AA
(0)-1)/AA(1))*FNP(RD,RL)):VO=DD-(RD+RS)*
IO:MX=ID*FNP(RD,RL):MN=((AA(0)-1)/AA(0))
*(V0-DS):GOSUB 4500:GOTO 2000
18400 GOSUB 4250:GOSUB 4400:LOCATE 0,18:
PRINT"08":LOCATE 0,20:PRINT"09".
18410 LOCATE 33,20:OP=9:INPUT"*  ";OP:IF
 OP<1 OR OP>9 OR OP-FIX(OP)<>0 THEN GOTO
 18400 ELSE LOCATE 0,23:ON OP GOSUB 6130
,6140,6150,6160,6170,6180,6190,18420,100
0:GOTO 18400
18420 RR=FNP(RD,RL)
18430 ZI=(RO+RR)*RS/(RS+RR+(1+GM*RS)*RO)
:SS=FNP(RS,RX):ZO=(RO+SS+GM*RO*SS)*RD/(R
O+SS+GM*RO*SS+RD):AA(0)=(1+GM*RO)*RR/(RO
+RR):ZS=RX:ZL=RL:GOSUB 4350:GOTO 2500
18600 FC=FX:K(1)=KI:K(2)=KO:GOSUB 7000:F
X=rC:KI=K(1):KO=K(2):KG=K(3):GOTO 1000 .
50000 KK$(1)="KK":KK$(2)="XX":SWAP KK$(1
),KK$(2):PRINT KK$(1),KK$(2)
```

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

01 - Determinar as coordenadas do ponto de operação do transistor especificado para as temperaturas de junção de 25 e 150 graus centígrados e estudar o desvio ocorrido entre as duas situações. O diagrama esquemático do circuito é o representado na figura 5.1. Os valores dos resistores e as características do transistor utilizado nas duas temperaturas especificadas são apresentados a seguir.

R1 = 22 kΩ VCC = 12 V R2 = 3,4 kΩ

RC = 1 kΩ RE = 200

Tj	ICB0	VBE	B
25	20 nA	0,7 V	200
125	5 uA	0,4 V	350

A execução do programa fornece inicialmente o menu principal, apresentado na figura 5.12, no qual escolhe-se a opção 1 - polarização do transistor bipolar.

A determinação dos valores de VB e RB, para o circuito equivalente de base resulta em

VB = VCC.R2/(R1=R2) = 1,606 V

RB = R1//R2 = 2,945 k

Os demais valores requeridos pelo menu de polarização do transistor bipolar podem ser obtidos diretamente do enunciado do problema. Após a introdução de todos os valores solicitados o menu em questão apresenta-se como na figura 5.13.

Na seqüência de cálculo, obtida pela execução da opção 12 deste menu, obtem-se os resultados apresentados na figura 5.14.

Observe-se que neste caso a variação da tensão VBE é a maior responsável pela variação da corrente de coletor, IC. A escolha de um método de

Figura 5.12 - Menu Principal.

```
Analise   de   amplificadores    basicos

1 - Polarizacao de transistor bipolar ..
2 - Polarizacao de transistor JFET .....
3 - Emissor comum ......................
4 - Coletor comum ......................
5 - Base comum .........................
6 - Emissor comum realimentado .........
7 - Fonte comum ........................
8 - Dreno comum ........................
9 - Porta comum ........................

* - Opcao ......................... ? █
```

Figura 5.13 - Menu de Polarização do Transistor Bipolar.

```
Analise do ponto de operacao  e  desvios
Dados necessarios    transistor bipolar

01 - VCC      = +1.200E+01 [  V ]
02 - VB       = +1.606E+00 [  V ]
03 - RB       = +2.945E+03 [  Ω ]
04 - RC       = +1.000E+03 [  Ω ]
05 - RE       = +2.000E+02 [  Ω ]
06 - ICBO1    = +2.000E-08 [  A ]
07 - ICBO2    = +5.000E-06 [  A ]
08 - VBE1     = +7.000E-01 [  V ]
09 - VBE2     = +4.000E-01 [  V ]
10 - β1       = +2.000E+02 [    ]
11 - β2       = +3.500E+02 [    ]

12 - Sequencia de calculo *****  * opcao
13 - Retorno ao  menu principal  *  ? █
```

Figura 5.14 - Pontos de Operação e Desvios.

```
Ponto de operacao ***** situacao inicial
VCE1   = +6.951E+00  IC1    = +4.208E-03

Ponto de operacao ***** situacao   final
VCE2   = +5.034E+00  IC2    = +5.805E-03

Analise  do  desvio  entre  as situacoes
S      = +1.465E+01  ΔICBO  = +4.980E-06
S'     = -4.657E-03  ΔVBE   = -3.000E-01
S''    = +8.494E-07  Δβ     = +1.500E+02

ΔIC(ΔICBO)                  = +7.294E-05
ΔIC(ΔVBE )                  = +1.397E-03
ΔIC(Δβ   )                  = +1.274E-04

ΔIC                         = +1.597E-03

Retorno ao  menu principal        <┘ ? █
```

compensação adequado deveria, então, levar em conta este fato.

OBSERVAÇÃO - Comparar a solução obtida por inter.édio do programa com a apresentada no exemplo 3.4 do livro Circuitos Eletrônicos - Volnei A. Pedroni - LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. As soluções apresentadas pelo programa são exatas, em função das análises efetuadas. O ponto de operação determinado na condição 1 considera a influência de RB e da corrente de fuga, o que frequentemente se despreza.

02 - Determinar as coordenadas do ponto de operação do transistor specificado para as temperaturas de junção de 25 e 75 graus centigrados e estudar o desvio ocorrido entre as duas situações. O diagrama esquemático do circuito é o representado na figura 5.3. Os valores dos resistores e as características do transistor utilizado nas duas temperaturas especificadas são apresentados a seguir.

R1 = 470 kΩ VDD = 20 V R2 = 4,7 kΩ

RD = 3,3 kΩ RS = 1,5 kΩ

Tj = 25 C IDSS = 10 mA VP = -4 V

Tj = 75 C IDSS = 15 mA Vp = -6 V

A determinação dos valores de VG e RG, para o circuito equivalente de porta (gate ou gatilho) resulta em

VG = VDD.R2/(R1=R2) = 1,818 V

RG = R1//R2 = 42,73 kΩ

Os demais valores requeridos pelo menu de polarização do transistor de efeito de campo de junção (JFET) podem ser obtidos diretamente do enunciado do problema. Após a introdução de todos os valores solicitados o menu em questão apresenta-se como na figura 5.15.

Figura 5.15 - Menu de Polarização do Transistor JFET.

```
Analise do ponto de operacao  e  desvios

Dados necessarios          transistor JFET

01 - VDD     = +2.000E+01 [  V ]
02 - RD      = +3.300E+03 [  Ω ]
03 - RS      = +1.500E+03 [  Ω ]
04 - VG1     = +1.818E+00 [  V ]
05 - VG2     = +1.818E+00 [  V ]
06 - VP1     = -4.000E+00 [  V ]
07 - VP2     = -6.000E+00 [  V ]
08 - IDSS1   = +1.000E-02 [  A ]
09 - IDSS2   = +1.500E-02 [  A ]

10 - Sequencia de calculo *****  * opcao

11 - Retorno ao  menu principal  *  ? █
```

Figura 5.16 - Pontos de Operação e Desvios

```
Ponto de operacao ***** situacao inicial
VDS1   = +7.828E+00  ID1    = +2.536E-03

Ponto de operacao ***** situacao   final
VDS2   = +4.026E+00  ID2    = +3.328E-03

Analise  do  desvio  entre  as situacoes
VG1    = +1.818E+00  VG2    = +1.818E+00
VP1    = -4.000E+00  VP2    = -6.000E+00
VGS1   = -1.986E+00  VGS2   = -3.174E+00
IDSS1  = +1.000E-02  IDSS2  = +1.500E-02
gm1    ≡ +2.518E-03  gm2    ≡ +3.345E-03

Retorno ao  menu principal          <┘ ? █
```

Na seqüência de cálculo, obtida pela execução da opção 10 deste menu, obtem-se os resultados apresentados na figura 5.16.

03 - O circuito em configuração emissor comum apresentado na figura 5.5 é construido com os componentes relacionados abaixo. Determinar o ponto de operação do transistor.

R1 = 47 kΩ   R2 = 12 kΩ   RC = 6,8 kΩ

RE = 1,8 kΩ   RSS = 0   RL = 6,8 kΩ

CI = 470 nF   CO = 15 nF   CE = 100 uF

VCC = 12 V   transistor BC548B

Inicialmente deve-se determinar o ponto de operação do transistor. Como primeira aproximação pode-se estimar o valor da corrente de coletor como

IC = (VB-VBE)/RE = 967,2 uA

onde considerou-se $VBE = 0,7$ V (uma vez que o transistor considerado é de silicio) e obteve-se VB e RB por

$$VB = VCC.R2/(R1+R2) = 2,441 \text{ V}$$

$$RB = R1//R2 = 9,559 \text{ k}\Omega$$

De posse deste valor da corrente de coletor, procuram-se nas curvas características do transistor BC548B os valores de hFE e de VBE. Estas curvas estão representadas nas páginas 223 e 224. Os valores obtidos são então VBE = 0,64 V e hFE = 275.

Desprezando-se a corrente de fuga no transistor bipolar pode-se afirmar que β = hFE. Desta maneira, pode-se usar a opção 1 do menú principal - Polarização do transistor bipolar - para a determinação do ponto de operação, definindo-se o valor da corrente de fuga (ICB0) como 0 e β = hFE.

Deste modo, com os valores de VB, RB, VCC, RC e RE especificados e fazendo-se ICB0 = 0 A, VBE = 0,64 V e β = 275 (hFE) no menu de polarização do transistor bipolar e pedindo-se a seqüência de cálculo obtem-se

VCE = 978,1 uA   VCE = 3,588 V

Pode-se efetuar mais aproximações (realmente o termo mais adequado seria iterações). Como com este valor da corrente de coletor obtem-se os mesmos valores de VBE e hFE que na iteração anterior, pode-se tomar este resultado como definitivo.

05 - Analisar as retas de carga e excursões de sinal, ganhos e impedâncias e a resposta em baixa freqüência do amplificador do exercício anterior.

A escolha da opção correspondente à configuração emissor comum, no menu principal, resulta no menu apresentado na figura 5.17, a partir do qual se seleciona opção 1 - retas de carga e excursão de sinal - e obtem-se em resposta o menu apresentando os dados necessários para esta análise.

O único valor necessário a esta análise e não disponível do exercício anterior é o valor da tensão

Figura 5.17 - Menu de Análise de Amplificador EC.

```
Amplificador ............. emissor comum

01 - Retas de carga e excursoes de sinal
02 - Tracado das retas de carga ........
03 - Ganhos e impedancias ..............
04 - Resposta em baixa frequencia ......
05 - Retorno ao  menu principal ........

** - Opcao ......................... ? █
```

VCE de saturação - VCEsat. O gráfico VCEsat = f(IC), apresentado na página 223, somente admite representação para valores de IC acima de 1 mA. Como o ponto de operação está bastante próximo disto (978,1 uA = 0,9781 mA), será considerado o valor de VCEsat correspondente

Figura 5.18 - Menu de Retas de Carga e Excursões de Sinal

```
Amplificador ............. emissor comum

Analise de retas de carga cc  e  ca ....
Analise de excursoes de sinal ..........

Dados necessarios .............

01 - VCEsat = +8.000E-02 [  V ]
02 - VCC    = +1.200E+01 [  V ]
03 - VCE    = +3.588E+00 [  V ]
04 - IC     = +9.781E-04 [  A ]
05 - RL     = +6.800E+03 [  Ω ]
06 - RE     = +1.800E+03 [  Ω ]
07 - RC     = +6.800E+03 [  Ω ]
08 - Sequencia de calculo *****  * opcao
09 - Retorno ao  menu principal  *  ? █
```

a IC = 1 mA, o que resulta em VCEsat = 80 mV.

A introdução dos valores necessário à análise de retas de carga e excursões de sinal, resulta no menu apresentado na figura 5.18, e a escolha da opção 8 do mesmo apresenta o valor de VCC necessário para coerência de dados, o que permite verificar se o ponto de operação (VCE , IC) especificado é coerente com os demais dados. Caso o valor de VCC apresentado se revele coerente, tecla-se RETURN, caso contrário introduz-se o valor correto de VCC (seguido de RETURN). A tela resultante deste teste de coerência de dados está na figura 5.19 e os resultados da análise estão na tela da figura 5.20.

Figura 5.19 - Teste de Coerência do Ponto de Operação.

```
VCC = +1.200E+01 para coerencia de dados

VCC = +1.200E+01

VCC ? █
```

Figura 5.20 - Resultados da Análise de Retas de Carga e Excursões de Sinal.

```
Amplificador ............. emissor comum

Reta de carga    cc    pontos    notaveis

VCE    = +0.000E+00    IC    = +1.395E-03
VCE    = +3.588E+00    IC    = +9.781E-04
VCE    = +1.200E+01    IC    = +0.000E+00

Reta de carga    ca    pontos    notaveis

VCE    = +0.000E+00    IC    = +2.033E-03
VCE    = +3.588E+00    IC    = +9.781E-04
VCE    = +6.914E+00    IC    = +0.000E+00

vomax = +3.326E+00    vomin = -3.508E+00

Condicao para maxima  excursao  de sinal

VCE    = +3.457E+00    IC    = +9.933E-04

Retorno ao  menu principal  ****  <┘ ? █
```

Observe-se que o ponto de operação do circuito está bastante próximo do ponto de operação para máxima excursão de sinal, o que fornece valores de vomin e vomax bastante próximos (em módulo).

No menu de análise de cada amplificador há uma opção que permite o traçado das retas de carga. A execução é bastante tranquila e o resultado obtido, para este exercício, encontra-se na figura 5.21. Para escape da tela gráfica tecla-se, neste programa, a barra de espaços.

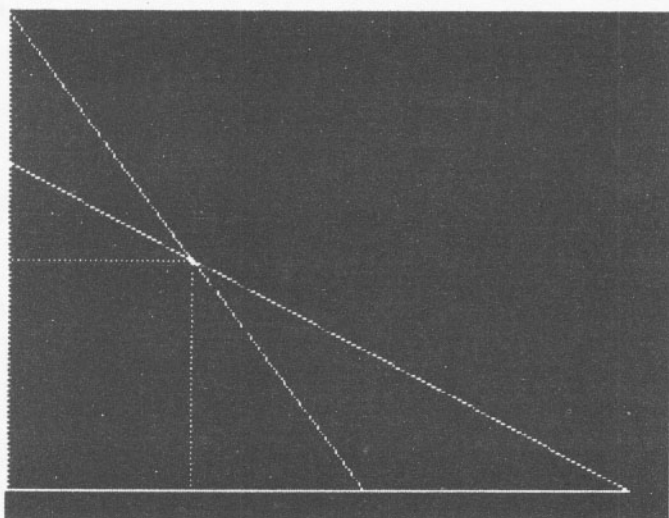
Figura 5.21 - Traçado da Reta de Carga.

Para análise dos ganhos (de tensão, corrente, transimpedância e transadimitância) e impedâncias (de entrada e saída), escolhe-se a opção 3 do menu de análise de amplificador. A verificação dos dados necessários revela que devem ser obtidos os valores de hie, hfe e hoe, cujos gráficos (para o transistor em questão - BC548B) encontram-se na página 225. Estes valores dependem da corrente de coletor IC. Como há curvas para VCE = 5 V e VCE = 10 V, utilizam-se as de VCE = 5V, o que neste caso é mais próximo do valor real. Deste modo obtem-se hie = 7,4 k, hfe = 335 (não trocar com hFE) e hoe = 22 uS (ou uA/V).

Figura 5.22 - Menu de Ganhos e Impedâncias.

```
Amplificador ............. emissor comum

Analise de ganhos e impedancias ........

Dados necessarios ............

01 - hie      = +7.400E+03 [  Ω ]
02 - hfe      = +3.350E+02 [    ]
03 - RSS      = +0.000E+00 [  Ω ]
04 - RL       = +6.800E+03 [  Ω ]
05 - RB       = +9.559E+03 [  Ω ]
06 - RE       = +1.800E+03 [  Ω ]
07 - RC       = +6.800E+03 [  Ω ]
08 - hoe      = +2.200E-05 [  S ]

09 - Sequencia de calculo *****  * opcao

10 - Retorno ao  menu principal  *  ? █
```

Figura 5.23 - Resultados da Análise e Ganhos e Impedâncias

```
Amplificador ............. emissor comum

Impedancias ...........................

Zi     = +4.171E+03    RSS    = +0.000E+00

Zo     = +5.915E+03    RL     = +6.800E+03

Ganhos ................................

Av     = -1.432E+02    Avs    = -1.432E+02

Ai     = -8.784E+01    Ais    = +0.000E+00

Az     = -5.973E+05    Azs    = +0.000E+00

Ay     = -2.106E-02    Ays    = -2.106E-02

Retorno ao  menu principal  ****  <┘ ? █
```

A introdução dos valores solicitados no menu de análise de ganhos e impedâncias resulta no menu apresentado na figura 5.22 e os resultados da análise estão na tela da figura 5.23.

Para a análise da resposta em baixa freqüência utiliza-se a opção 4 do menu de análise do amplificador, cuja escolha resulta no menu apresentado na figura 5.24. A opção de interesse, neste exercício é a de número 2, uma vez que os valores dos capacitores já estão definidos.

Figura 5.24 - Menu de Análise de Resposta em Baixa Freqüência

```
Amplificador ............. emissor comum

Analise de resposta em baixa  frequencia

01 - f1    ---->      capacitores

02 - Capacitores    ---->   f1

03 - Retorno ao  menu principal




** - Opcao  ? █
```

A execução da opção 2 do menu de análise do amplificador permite a entrada dos valores dos capacitores e o prosseguimento dos cálculos. Este menu, após introduzidos os valores dos capacitores, resulta como apresentado na figura 5.25. A escolha da seqüência de cálculo resulta na tela apresentada na figura 5.26. Observe-se que são representadas as resistências equivalentes de cada capacitor e a sua contribuição na freqüência de corte inferior - f1. No caso, a contribuição do capacitor CO é majoritária, e o mesmo determina um polo dominante.

Figura 5.25

```
Amplificador ............ emissor comum
Analise de resposta em baixa  frequencia

01 - CI       = +4.700E-07 [  F ]
02 - CO       = +1.500E-08 [  F ]
03 - CE       = +1.000E-04 [  F ]


04 - Sequencia de calculo *****  * opcao
05 - Retorno ao  menu principal  *  ? █
```

Figura 5.26 - Resposta em Baixa Freqüência.

```
Amplificador ............ emissor comum
Analise de resposta em baixa  frequencia

                             Req         p
CI    +4.700E-07  +4.171E+03  +8.119E+01
CO    +1.500E-08  +1.272E+04  +8.345E+02
CE    +1.000E-04  +2.176E+01  +7.315E+01
                         f1  +8.345E+02

CO e polo dominante - para analise deta-
lhada realizar os estudos dos  diagramas
de Bode de modulo e de fase ***********

Retorno ao  menu principal ****** <┘ ? █
```

06 - O circuito em configuração base comum apresentado na figura 5.7 é construído com os componentes relacionados abaixo. Determinar o ponto de operação do transistor e analisar as retas de carga e excursões de sinal, ganhos e impedâncias e resposta em baixa freqüência. Os valores dos componentes empregados e o valor da tensão de alimentação são relacionados a seguir.

R1 = 47 kohms R2 = 12 kohms RC = 6,8 kohms

RE = 1,8 kohms RSS = 50 ohms RL = 6,8 Kohms

CI = 470 nF CI = 100 uF CO = 15 nF

VCC = 12 V transistor BC548B

Para determinação do ponto de operação do transistor observe-se que o circuito, em termos de corrente contínua, é idêntico ao do problema 03, pois para efeitos de corrente contínua atuam apenas os componentes R1, R2, RC, RE e o transistor. Assim sendo, a determinação do ponto de operação é idêntica à realizada no exercício 03, resultando em VBE = 0,64 V , VCE = 3,588 V e IC = 978,1 uA.

A análise de retas de carga e excursões de sinal segue a mesma seqüência de análise do exercício 04 (amplificador emissor comum) e os resultados também são os mesmos.

Para análise de ganhos e impedância mantém-se o valor de hie e hfe do exercício 4, uma vez que o ponto de operação e o transistor são os mesmos. Os resultados estão na figura 5.27 . Observe como o ganho Avs é bastante inferior ao ganho Av. Isto ocorre porque a impedância da fonte de sinal (RSS) é bastante alta em comparação com a impedância da fonte de sinal (Zi).

Para análise de resposta em freqüência segue-se a mesma seqüência do exercício 05, obtendo-se os resultados da figura 5.28 .

07 - Verificar o valor das excursões de sinal proporcionadas pelo amplificador configuração coletor comum proposto ao se variar o ponto de operação do

mesmo de 1 a 4 mA de 1 em 1 mA. Os dados disponíveis estão relacionados a seguir.

VCC = 10 V VCEsat = 100 mV RE = 2 kohms

Para IC = 1 mA tem-s

VCE = VCC - RE.IC = 8 V

Introduzindo-se estes dados no menu de análise de retas de carga e excursões de sinal e solicitando-se a seqüência de cálculo obtem-se:

vomin =-0,6667 V vomax = +7.900 V

Procedendo-se de modo semelhante para os outros valores do ponto de operação pode-se construir a tabela apresentada a seguir.

IC [mA]	VCE [V]	vomin [V]	vomax [V]
1	8	-0,6667	+7,900
2	6	-1,333	+5,900
3	4	-2,000	+3,900
4	2	-2,667	+1,900

Observe que em conjunto com os resultados apresentados em cada tela é apresentado o ponto de operação correspondente à condição de máxima excursão de sinal, o que para este circuito resulta em:

VCE = 2,575 V IC = 3,712 mA

Verificando-se o valor das excursões de sinal correspondentes a este ponto de operação tem-se:

vomin = -2,475 V vomax = +2,475 V

08 - O circuito em configuração fonte comum apresentado na figura 5.9 é construído com os componentes relacionados abaixo. Determinar o ponto de operação do transistor e analisar as retas de carga e excursões de sinal, ganhos e impedâncias. Calcular os capacitores para que o circuito apresente

freqüência de corte inferior a 100 Hz. Os valores componentes empregados e o valor da tensão de alimentação são relacionados a seguir.

R1 = 430 kohms   R2 = 56 kohms   RD = 5,6 kohms

RS = 2,2 kohms   RSS = 50 kohms   RL = 10 kohms

VDD = 18 V   transistor BF245A

Para a determinação do ponto de operação procede-se como no exercício 2 deste capítulo.

Para tal necessita-se dos valores de VP e IDSS do transistor BF245A o que pode ser obtido da curva característica do mesmo, a qual se encontra na página 226. VP é o valor de VGS que zera ID - no caso VP = -2 V. IDSS é a corrente de dreno de saturação correspondente a VGS = 0 V, no caso IDSS = 4 mA. Os valores de VG e RG são obtidos por:

VG = VDD.R2/(R1+R2) = 2,074 V
RG = R1//R2 = 49,55 kohms

Processando-se estes valores como no exercício 2 obtem-se VDS = 7,642 V e ID = 1,328 mA. O valor de VGS correspondente é -0,8476 V.

Uma vez determinado o ponto de operação pode-se analisar as retas de carga e excursões de sinal. O procedimento é semelhante ao das outras configurações, com os dados necessários sendo especificados no menu.

Para os transistores de efeito de campo de junção (JFET) considera-se VDSmin = -VP , no caso VDSmin = -(-2) = 2 V. Os demais dados solicitados pelo menu são disponíveis de imediato.

O processamento destes dados resulta em vomin = -5,642 V e vomax = 4,767.

A análise de ganhos e impedâncias também é semelhante à dos exercícios anteriores.

A partir dos dados solicitados pelo menu correspondente verificamos ser necessário obter-se os valores da transcondutância direta gm e da resistência dinâmica de dreno rd. O valor de gm obtem-se diretamente do gráfico 4 da página 227 - |Yfs| = f(ID). No caso, para o BF245A e ID = 1,328 mA tem-se gm = |Yfs| = 3,25 mA/V (mS). O valor de rd é obtido a

partir de gos, no gráfico 5 da página 227 por rd = 1/gos. Como se trata de um amplificador para baixas e médias freqüências adotamos o valor de gos especificado para a menor freqüência especificada, no caso, 10 MHz. O valor de gos obtido resulta em 25 uA/V (uS) e rd = 1/gos em 40 kohms.

A análise de ganhos e impedâncias resulta em Zi = 49,55 kohms, Zo = 4,912 kohms, Av = -10,71, Avs = -5,329, Ai = -53,05, Ais = -26,64, Az = -530,5 kohms, Azs = -266,4 kohms, Ay=-1,071 mS e Ays = -532,9 uS.

Para cálculo dos capacitores acessa-se o menu de resposta em baixa freqüência, escolhe-se opção 1 do mesmo e obtem-se a tela apresentada na figura 5.28 onde já se especificou a freqüência de corte desejada - 100 Hz. Na seqüência de cálculo obtém-se a tela apresentada na figura 5.29 .

Obviamente que em uma situação real tem-se que lançar mão de valores comercialmente disponíveis. Utilizando-se CI=150 nF, CO = 1 uF e CS = 4,7 uF obtem-se f1 = 125,4 Hz sendo a contribução de CS em f1 dominante. Neste caso procuramos o valor comercial mais próximos a CS obtido inicialmente e a CI e CO obtidos inicialmente multiplicados por 10.

09 - Utilizando-se o transistor de efeito de campo BF245B projetou-se um amplificador em configuração dreno comum que resultou nos valores relacionados abaixo:

R1 = 270 kohms   R2 = 180 kohms   RS = 2,7 kohms

RL = 1 kohms   CI = 150 nF   CO = 1,5 uF   VDD = 18 V

O amplficador em questão foi projetado de modo a atender os seguintes critérios de projeto:

Av Y 0,5   Zi Y 100 kohms   f1 00 Hz

vomin 2,5 V   vomax Y +2,5 V

Verificar se os critérios de projeto são realmente atendidos.

Inicialmente determina-se o ponto

operação. A partir da curva característica do transistor BF245B, na página 226, obtem-se VP = -4 V e IDSS = 10 mA. VG e RG são obtidos por:

VG = VDD.R2/(R1+R2) = 7,200 V

RG = R1//R2 = 108,0 kohms

Juntamente com VDD = 18 V e RD = 0 ohms os valores acima resultam em:

VDS = 9,097 V e ID = 3,297 mA

A seqüência de análise para a obtenção de vomin e vomax é semelhante à dos exemplo anteriores. O valor de VDSmin é obtido por:

VDSmin = -VP = -(-4) V = 4 V

Os demais valores necessários são todos diponíveis e os valores obtidos são:

vomin = -2,406 V   vomax = 5,097 V

Para a análise de ganhos e impedâncias é necessária a obtenção dos valores de gm e rd (em caso de dúvida quanto a obtenção destes valores vide exemplo anterior). A partir do gráfico 4 da página 227, com ID = 3,297 mA tem-se gm = 3,7 mS e a partir do gráfico 5 da página 227 tem-se rd = 40 kohms. A análise de ganhos e impedância resulta em:

Av = 0,7261   Zi = 108,0 kohms

Para a resposta em baixa freqüência todos os dados necessários são disponíveis e obtem-se como resultado:

f1 = 95,10 Hz

Comparando-se os resultados obtidos com os especificados nos critérios de projeto verfica-se que, com exceção de vomin, todos os outros critérios são satisfeitos. Observe-se porém que em termos práticos, devido ao pequeno erro obtido, pode-se considerar este critério de projeto atendido.

OBSERVAÇÃO - Comparar este problema e o projeto 5.1 do livro Circuitos Eletrônicos - Volnei A. Pedroni - LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Este problema (o 9) é uma plicação típica deste programa na análise de desempenho de circuitos.

10 - Mantendo-se VDD, RS RL, CI, CO, e o transistor do projeto anterior, recalcular os resistores R1 e R2 a partir do ponto de operação correspondente à máxima excursão de sinal e verificar se os critérios de projeto são atendidos de maenira mais eficiente.

A partir da análise de retas de carga e excursões de sinal do problema 9 tem-se que o ponto de operação para máxima excursão de sinal possui coordenadas

VDS = 6,979 V   ID = 4,082 mA

O valor de VGS correspondente a um valor qualquer de ID é expresso por dado por:

VGS = VP.(1-SQR(ID/IDSS)) = -1.444 V

O valor correspondente da tensão VG é:

VG = VGS + RS.ID = 9,578 V

Usando-se como RG o valor de 100 kohms previsto para a impedância de entrada nos critérios de projeto obtem-se o valor de R1 e R2 por:

R1 = VDD.RG/VG = 187,9 kohms

R2 = VDD.RG/(VD-VG) = 213,7 kohms

Os valores comerciais mais próximos disponíveis são 180 kohms e 220 kohms. Porém a adoção destes dois valores resulta em

Zi = RG = R1//R2 = 99,00 kohms 00 kohms

que não atende ao critério inicial do projeto Zi Y 100

kohms. Desta forma utilizar-se-á R1 = R2 = 220 kohms.

Uma vez definidos os valores de R1 e R2 o problema torna-se idêntico ao problema 9. Os valores dos dados e resultados são então apresentados abaixo.

VG = 9 V   RG = 110 kohms   VGS = -1,476 V

VDS = 7,495 V   ID = 3981 mA   gm = 3,85 mS

rd = 40 kohms   Av = 0,7340   Zi = 110 kohms

vomin = -2,839 V   vomax = 3,495 V

f1 = 95,22 Hz

Observe-se que para estes valores os critérios iniciais do projeto são atendidos com uma folga inexistente no projeto original.

OBSERVAÇÃO - Este problema é um exemplo de como este programa pode ser aplicado no projeto de amplificadores de modo a otimizar um projeto.

11 - O circuito em configuração base comum apresentado na figura 5.11 é construído com os componentes relacionados abaixo. Determinar o ponto de operação do transistor, excursões de sinal, ganhos de tensão e freqüência de corte inferior. Os valores dos componentes empregados e o valor da tensão de alimentação são relacionados a seguir.

RG = 100 kohms   RS = 1 kohms   RD = 2,2 kohms

RSS = 50 ohms   RL = 6,8 Kohms   VDD = 24 V

CI = 2,2 uF   CO = 2,2 uF   transistor BF245C

OBSERVAÇÃO - Neste circuito há apenas um único resistor ligado à porta (gate) do transistor, na posição correspondente a R2.

Para determinação do ponto de operação obtem-se o valor de VP e IDSS nas curvas características do transistor BF245C na página 226 o

que resulta em:

VP = -6,5 V   IDSS = 17 mA

Para a obtenção de VG e RG pode-se considerar R1 = *- (infinito) e R2 = 100 kohms, o que resulta em:

VG = 0 V   RG = 100 kohms

Em conjunto com os demais dados, a análise de polarização do JFET resulta em:

VDS = 12,69 V   ID = 3.536 mA

OBSERVAÇÃO - NO CASO DO AMPLIFICADOR CONFIGURAÇÃO PORTA COMUM (SOMENTE NESTE) A ANÁLISE DE GANHOS E IMPEDÂNCIAS DEVERÁ SER EFETUADA ANTES DA ANÁLISE DE RETAS DE CARGA E EXCURSÕES DE SINAL.

Para que o usuário não julgue estar diante de um mistério convém esclarecer que na configuração porta comum o ganho possui influência nas excursões de sinal.

Os valores de gm e rd são obtidos como nos exemplos anteriores e resultam em gm = 3,25 mS e rd = 40 kohms (cuidado em não querer afirmar que estes valores são sempre iguais - ocorreu uma rara coincidência). Em conjunto com os demais dados a análise de ganhos e impedâncas resulta em:

Av = 4,819   Avs = 3,990

Para a determinação das excursões de sinal obtem-se o valor de VDSmin por

VDSmin = -VP = 6,5 V

que em conjunto com os demais dados resulta em:

vomin = -4,906 V   vomax = +5,402 V

A análise de resposta em baixa freqüência é

semelhante às efetuadas nos demais exercícios e resulta em:

f1 = 248,9 Hz

12 - Dois amplificadores com transistores bipolares em configuração emissor comum realimentado são ligados em cascata como indicado na figura 1.30. Determinar o ponto de operação de cada transistor e, para o amplificador resultante, as excursões de sinal, o ganho de tensão, as impedâncias de entrada e saída e a freqüência de corte inferior. Os valores dos componentes utilizados e da fonte de alimentação são apresentados a seguir.

R1 = R3 = 12 kohms R2 = R4 = 82 kohms

RC1 = RC2 = 3,3 kohms RE1 = RE2 = 470 ohms

CI = 330 nF CA = 4,7 uF CO = 4,7 uF

RSS = 0 ohms RL = 10 kohms VCC = 12 V

transistores BC548A

Inicialmente observe-se que, em termos de corrente contínua, os dois estágios são idênticos o que acarretará em pontos de operação iguais para ambos os transistores. Como primeira aproximação estima-se (ver exercício 3 para detalhamento sobre a obtenção do ponto de operação de um circuito especificado):

IC = (VB-0,7)/RE = 1,770 mA

sendo VB e RB (para uso posterior) obtidos por

VB = VCC.R2/(R!+R2) = 1,532 V

RB = R1//R2 = 10,47 kohms

A partir deste valor de corrente de coletor (IC), obtem-se, a partir o gráfico 3 da página 224, hFE = 185 e, a partir do gráfico 2 da página 223, VBE = 0,65 V. Estes valores resultam, como segunda

aproximação, em (ver problema 3):

IC = 1,667 mA   VCE = 5,716 V

A obtenção dos valores de hFE e VBE para estes valores resulta idêntica à da primeira aproximação de modo que pode-se tomar o resultado anterior como definitivo.

A análise de retas de carga e excursões de sinal será efetuada apenas para o segundo estágio, sobre o qual se toma o sinal de sáida. A partir do menu correspondente verifica-se que o único dado não disponível consiste em VCEsat, o qual pode ser obtido a partir do gráfico 1 na página 223. O valor correspondente a IC = 1,667 mA é VCEsat = 75 mV. Na seqüência de cálculo obtem-se:

vomin = -4,743 V   vomax = +4,136 V

A análise de ganhos e impedância de amplificadores ligados em cascata costuma-se efetuar do último para o primeiro estágio.

A obtenção dos valores de hie e hfe, a partir dos gráficos 6 e 7 da página 225, resulta em (considerar as curvas do VBC548A com VCE = 5V - este valor está mais próximo da tensão VCE no ponto de operação):

hie = 3,2 kohms   hfe = 220

Todos os valores necessário à analise de ganhos e impedâncias do segundo estágios são então disponíveis, com exceção de RSS. A impedância de saída do primeiro estágio (Zo1) se comporta como impedância da fonte de excitação do segundo estágio (RSS2). Por enquanto desconsidera-se este valor, pois não tem influência no ganho de tensão Av (somente influencia em Avs, Ais, Azs e Ays, nos quais não há interesse neste caso). Os resultados obtidos na seqüência de cálculo são:

Av2 = -5,065
Zi2 = 9,386 kohms
Zo2 = 3,300 kohms

onde acrescentou-se o índice 2 para diferencia estes

resultados dos obtidos para o primeiro estágio.

Para análise de ganhos e impedâncias do primeiro estágio observe-se que a impedância de entrada do segundo estágio (Zi2) se comporta como impedância de carga para o primeiro estágio (RL1). Assim sendo, todos os dados necessários à análise de ganhos e impedâncias do primeiro estágio sã disponíveis. Na seqüência de cálculo obtem-se:

Av1 = -4,984
Zi1 = 9,386 kohms
Zo1 = 3,300 kohms

O ganho do amplificador resultante desta associação em cascata é expresso por:

Av = Av1.Av2 = 24,24

A impedância de entrada é a impedância do primeiro estágio uma vez que o sinal da fonte de excitação é aplicado ao mesmo. A impedância de saída é a impedância de saída do segundo estágio, una vez que o sinal de saída é obtido deste. Assim sendo:

Zi = Zi1 = 9,386 kohms   Zo = Zo2 = 3,300 kohms

Uma vez que todos os valores dos ganhos e impedâncias de cada estágio estão disponíveis, pode-se efetuar a análise de responta em baixa freqüência a partir de qualquer um dos estágios. A seqüência é a mesma dos exercícios anteriores.

Para o primeiro estágio o capacitor CA corresponde ao capacitor CO. Efetua-se inicialmente a análise de ganhos e impedâncias do primeiro estágio (não esquecer que RL1 = Zi2) e em seguida a de resposta em baixa freqüência. As contribuições de cada um dos capacitores são:

pI = 51,39 Hz   pA = 2,669 Hz

Para o segundo estágio o capacitor CA corresponde ao capacitor CI. Efetua-se inicialmente a análise de ganhos e impedâncias (não esquecer que RSS2 = Zo1) e em seguida a de resposta em baixa freqüência. As contribuições de cada um dos capacitores são:

pA = pI = 2,669 Hz   pO = 2,546 Hz

Agrupando-se as contribuições de todos os capacitores (o capacitor CA é considerado uma vez apenas) tem-se:

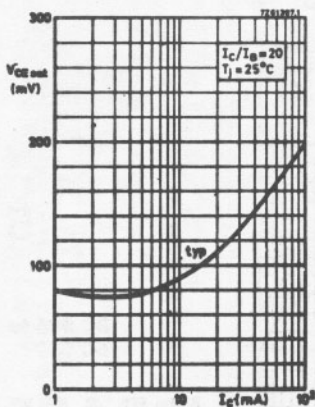
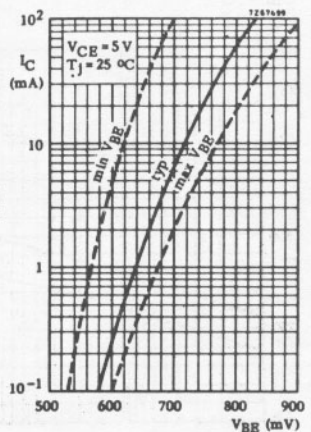
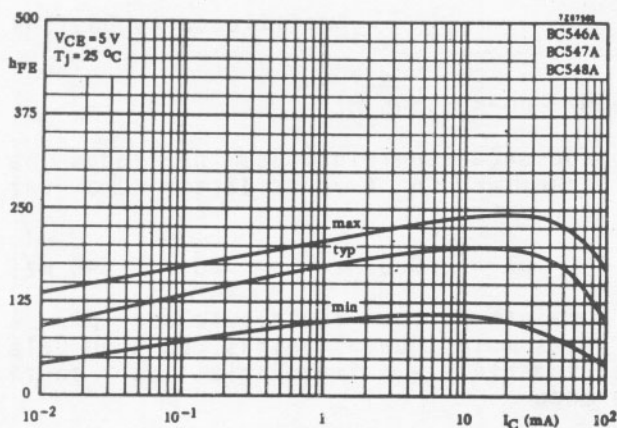
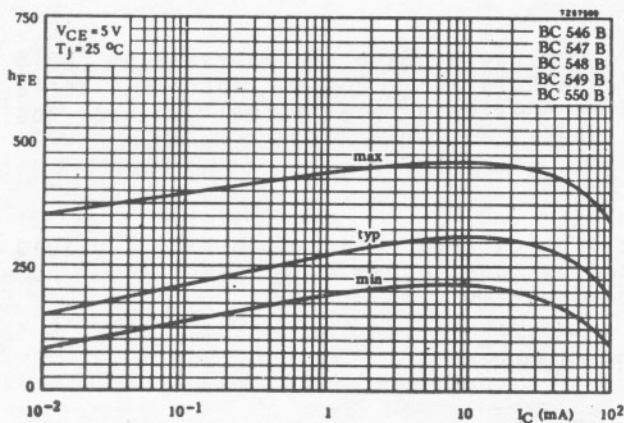
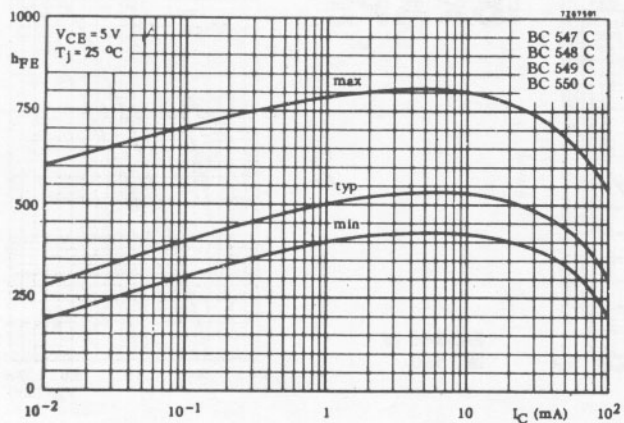
pI = 51,39 Hz   pA = 2,669 Hz   pO = 2,546 Hz

Como a maior destas contribuições, pI, é pelo menos dez vezes maior que as outras, pA e pO, ela representa efetivamente a freqüência de corte inferior. Deste modo

f1 = 51,39 Hz

sendo pI um pólo dominante. Caso não houvesse um pólo dominante a freqüência de corte inferir seria aproximadamente o somatório dos pólos devidos aos diversos capacitores.

Observação - Na bibliografia referente a este capítulo há vários exercícios que podem ser resolvidos por intermédio deste programa.

GRÁFICOS DE TRANSISTORES

8

typ. values
V_{CB} = 5 to 10 V
f = 1 kHz
T_j = 25 °C

h_{oe} (µA/V)

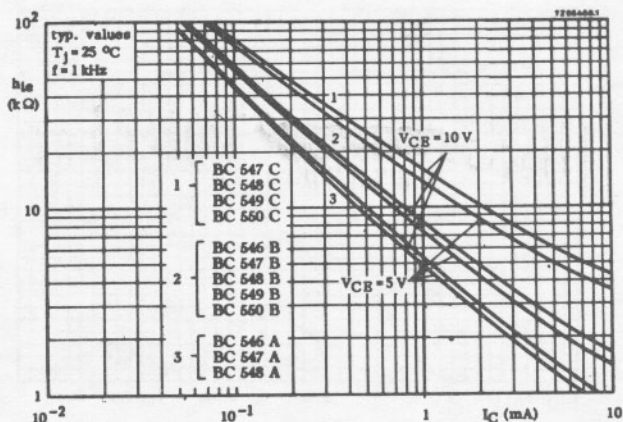
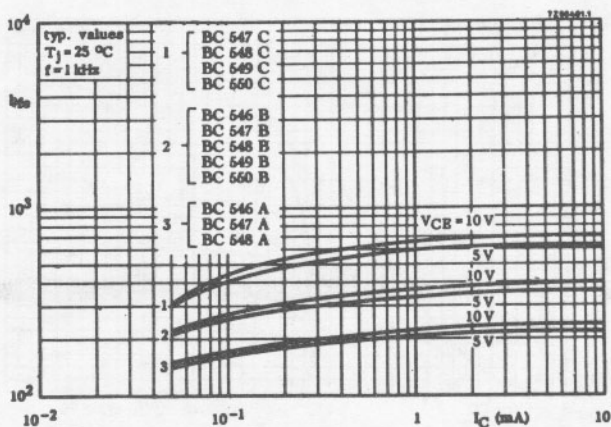
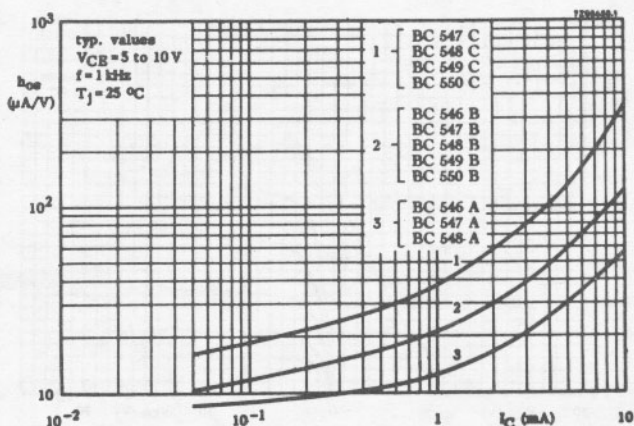
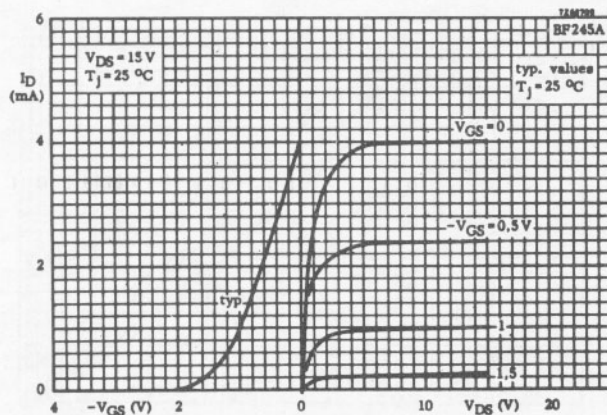
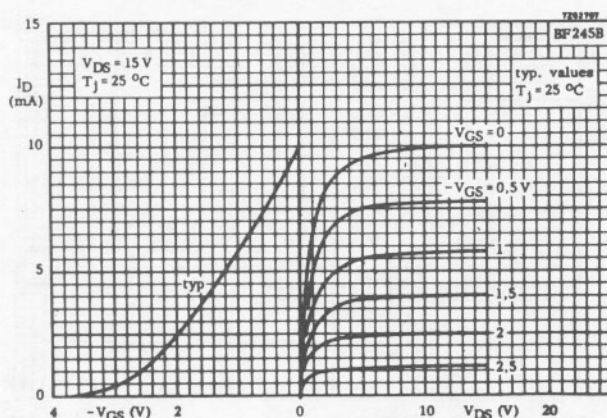
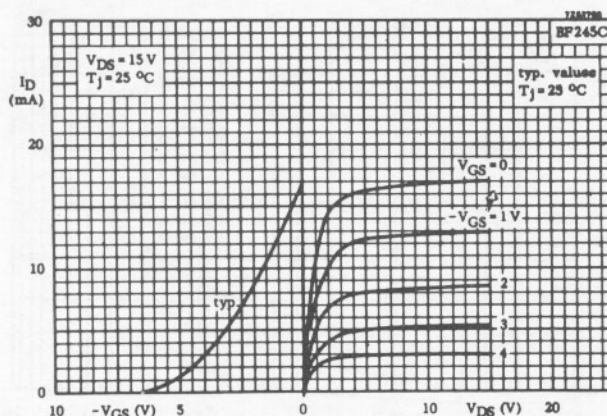
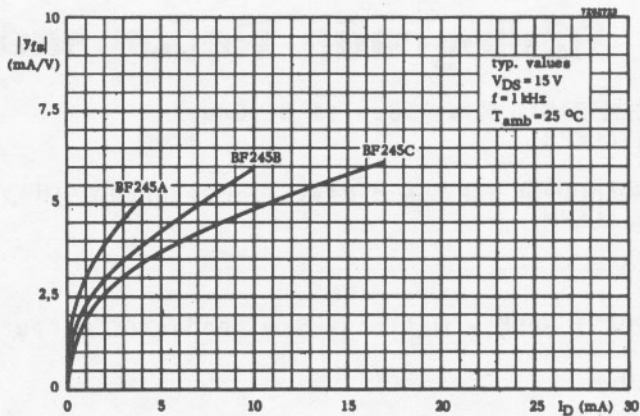
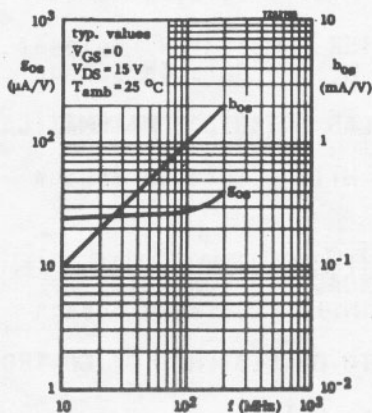
1 – BC 547 C, BC 548 C, BC 549 C, BC 550 C
2 – BC 546 B, BC 547 B, BC 548 B, BC 549 B, BC 550 B
3 – BC 546 A, BC 547 A, BC 548 A

10^3 · 10^2 · 10
10^{-2} · 10^{-1} · 1 · I_C (mA) · 10

BF245A
V_{DS} = 15 V
T_j = 25 °C
typ. values
T_j = 25 °C
I_D (mA)
V_{GS} = 0
$-V_{GS}$ = 0,5 V
1
1,5
typ
$-V_{GS}$ (V)
V_{DS} (V)
BF245B
V_{DS} = 15 V
T_j = 25 °C
typ. values
T_j = 25 °C
I_D (mA)
V_{GS} = 0
$-V_{GS}$ = 0,5 V
1
1,5
2
2,5
typ
$-V_{GS}$ (V)
V_{DS} (V)
BF245C
V_{DS} = 15 V
T_j = 25 °C
typ. values
T_j = 25 °C
I_D (mA)
V_{GS} = 0
$-V_{GS}$ = 1 V
2
3
4
typ
$-V_{GS}$ (V)
V_{DS} (V)

1

2

3

4
|yfs|
(mA/V)
10
7,5
5
2,5
0
typ. values
V_{DS} = 15 V
f = 1 kHz
T_{amb} = 25 °C
BF245A
BF245B
BF245C
0
5
10
15
20
25
I_D (mA)
30
5
10^3
10^2
10
1
g_{os}
(µA/V)
typ. values
V_{GS} = 0
V_{DS} = 15 V
T_{amb} = 25 °C
b_{os}
g_{os}
b_{os}
(mA/V)
10
1
10^{-1}
10^{-2}
10
10^2
f (MHz)
10^3
BF245A to C
IBRAPE
BF245A to C
IBRAPE

Bibliografia Recomendada

LINGUAGEM BASIC MSX - Denise S. Cruz
Editora ALEPH

APROFUNDANDO-SE NO MSX - Piazzi, Maldonado, Oliveira
Editora ALEPH

CAPÍTULO 1

LINEAR DATA BOOK - National Semiconductor Corporation

CAPÍTULO 3

CIRCUITOS ELÉTRICOS - Joseph A. Edminister
Editora Mc Graw Hill - Coleção Schaun

ANÁLISE DE FOURIER - Murray R. Spiegel
Editora Mc Graw Hill - Coleção Schaun

MANUAL DE FÓRMULAS E TABELAS MATEMÁTICAS - Murray R. Spiegel
Editora Mc Graw Hill - Coleção Schaun

CAPÍTULO 4

SISTEMAS DE RETROAÇÃO E CONTROLE
Editora Mc Graw Hill - Coleção Schaun

ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE LINEARES - D'azzo e Houpis
Editora Guanabara Dois

CAPÍTULO 5

CIRCUITOS ELETRÔNICOS - Volnei A. Pedroni
Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

CIRCUITOS ELETRÔNICOS - Schiling e Belov - Eletrônica Milmar/Halkias
Editora Mc Graw Hill

TRANSÍSTORES - DADOS E CURVAS PARA PROJETOS - IBRAPE

OUTROS LIVROS DA EDITORA ALEPH

LINGUAGEM BASIC MSX

Denise Santoro Cruz

Uma "enciclopédia" do BASIC MSX, com a sintaxe, função e exemplo de cada palavra do BASIC MSX.

CURSO DE BASIC MSX v.1

Carvalho Jr. e Piazzi

Uma introdução clara e didática ao BASIC residente do MSX, apresentada em 8 aulas com exercícios (e suas respostas!).

COLEÇÃO DE PROGRAMAS PARA MSX v.1 e v.2

Oliveira et al

Programas didáticos, aplicativos e utilitários explicados passo a passo para que o leitor aprenda a fazer seus próprios programas.

APROFUNDANDO-SE NO MSX

Piazzi, Maldonado, Oliveira et al

O "best seller" da literatura técnica sobre MSX, com a descrição detalhada da arquitetura da máquina e de cada uma de suas partes.

PROGRAMAÇÃO AVANÇADA EM MSX

Figueredo, Maldonado e Rosseto

Exemplos e rotinas utilitárias em ASSEMBLY ensinando ao leitor como se obtém o máximo das máquinas MSX.

LINGUAGEM DE MÁQUINA MSX

Figueredo e Rossini

Uma introdução completa e didática aos poderosos recursos da Linguagem de Máquina Z80 aplicada aos micros MSX. Contém as instruções secretas do Z80.

USANDO O DISK DRIVE NO MSX

Rubens Pereira Silva Jr.

O MSXDOS, O CP/M para MSX e o DISK BASIC comentados exaustivamente.

SISTEMA DE DISCO PARA MSX
Oliveira e Pereira
O SOLXDOS e o BASIC de DISCO comentados passo a passo de forma clara e didática.

DRIVES LEOPARD DE 3 1/2"
Carvalho Jr., Piazzi e Oliveira
O primeiro livro sobre drives de 3 1/2" editado no Brasil. Contém todos os recursos do MSXDOS e do DISK BASIC MSX aplicados aos drives de 3 1/2".

100 DICAS PARA MSX
Oliveira et al
Mais de 100 dicas sobre todos os recursos dos micros MSX prontas para serem usadas. Um livro para todos os tipos de usuários.

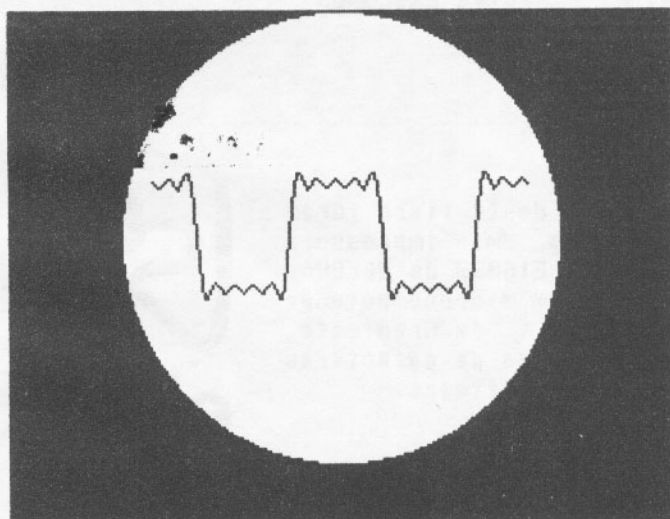
CURSO DE MÚSICA MSX v.1
Barbieri e Piazzi
Uma abordagem prática de toda a teoria musical, usando como instrumento um micro MSX. Com exercícios propostos e suas soluções.

PROGRAMA TERMINAL

O programa de apenas duas linhas (Two Liner) listado a seguir foi extraido do livro "Coleção de Programas Para MSX v.1".

Ao ser executado ele faz com que a tela de seu MSX se assemelhe a de um osciloscópio e permite visualizar a forma de onda resultante da soma dos harmônicos ímpares de uma frequência qualquer. A primeira imagem éa do 1º harmônico, a segunda imagem é a da soma do 1º com o 3º harmônico, e assim por diante.

Para mudar de uma imagem para outra digite a barra de espaços.

```
1 COLOR15,12,12:PI=4*ATN(1):IFSTRIG(0)<>
-1ANDP<>0THEN1
2 P=P+1:SCREEN2:CIRCLE(128,85),84,1:PAIN
T(128,168),1:FORX=55TO200:Z=0:C=-X*(X=55
)-C*(X<>55):FORM=1TOPSTEP2:Y=80/(M*PI)*S
IN(X*M*PI/36):Z=Z+Y:NEXT:Y=Z+85:L=-Y*(X=
55)-L*(X<>55):LINE(C,L)-(X,Y),15:PSET(X,
Y):C=X:L=Y:NEXT:P=P+1:GOTO1
```

Para receber gratuitamente o boletim informativo da ALEPH, contendo dicas de programação, artigos técnicos e informações sobre os últimos lançamentos para seu micro, envie seu nome e endereço completos (incluindo o CEP) para:

EDITORA ALEPH
Caixa Postal: 20.707
01498 São Paulo SP

Se você quiser adquirir os programas listados neste livro já gravados em DISCO (apenas em disco!!!), entre em contato conosco.

Para comprar nossos livros pelo correio, informe-se escrevendo ou telefonando para nós.

Nosso telefone é:

(011) 843-3202

Os originais deste livro foram produzidos com uma impressora MÔNICA modelo EI6030 da ELEBRA, conectada a um microcomputador MSX EXPERT V 1.1 da Gradiente, usando-se fontes de caracteres carregadas por software.

A "Série Didática" é mais uma iniciativa pioneira da EDITORA ALEPH visando levar aos seus leitores conceitos especificos atraves de textos claros e, realmente, didáticos. O uso do microcomputador na educação pode ser desastroso ou extremamente proveitoso, dependendo da forma como ele for usado. Na "Série Didática" a utilização dos micros é o tema central, sendo repleta de exemplos de usos proveitosos.

circuitos eletrônicos

Este livro fornece, de maneira clara, didática e objetiva, uma grande quantidade de ferramentas para estudo, análise de desempenho e projeto de circuitos eletrônicos. A utilização do microcomputador permite a obtenção de gráficos e cálculos que, de outra forma, seriam extremamente trabalhosos.

O resumo da teoria, apresentado em cada capítulo, e uma série de exercícios resolvidos mostram várias possibilidades de solução que podem ser obtidas com estes softwares extremamente versáteis.

ALEPH PUBLICAÇÕES E ASSESSORIA PEDAGÓGICA LTDA.
CP. 20.707 - CEP 01498 - SÃO PAULO - (011) 843-3202